



Mika Tuominen

Moottoriteiden liikennevirran ominaisuudet

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 27.05.2013
Valvoja: Prof. Tapio Luttinen
Ohjaaja: DI Virpi Ojala

Tekijä Mika Tuominen

Työn nimi Moottoriteiden liikennevirran ominaisuudet

Laitos Yhdyskunta- ja ympäristötekniikka

Professori Liikennetekniikka

Professuurikoodi Yhd-71

Työn valvoja Professori Tapio Luttinen

Työn ohjaaja DI Virpi Ojala

Päivämäärä 27.05.2013

Sivumäärä 56+46

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Tutkimuksessa on tarkasteltu liikennevirran makroskooppisia ominaisuuksia moottoritien linjaosuuksilla. Liikennevirran ominaisuudet noudattavat liikennevirran perusyhtälöä, jossa liikennemäärä, keskinopeus ja liikennetiheys ovat toisistaan riippuvia suureita. HCM Highway Capacity Manual on yhdysvaltalainen julkaisu, joka käsittelee liikennevirran ominaisuuksia. HCM:n menetelmä moottoriteiden linjaosuudella perustuu laskennallisen henkilöautomäärän sekä laskennallisen vapaan nopeuden määrittelemiin liikennevirran liikennemäärä-keskinopeusmalleihin.

Tässä tutkimuksessa on pyritty kalibroimaan HCM 2010:n moottoritien linjaosuuksien malli mittausaineiston liikenteellä. Mittausaineisto on kerätty vuosien 2010–2012 ajalta 42:sta Liikenneviraston ylläpitämästä liikenteen automaattisen mittausjärjestelmän (LAM) pisteestä. Tutkimuksessa on käytetty aineistoa, josta on poistettu onnettomuuksista, tietöistä ja huonosta ajokelistä johtuvat häiriölliset vuorokaudet. Aineistoa käsiteltiin mittauspiste- sekä kaistakohtaisesti. Mittausaineistosta laskettiin harmoniset keskinopeudet, liikennemäärät, raskaan liikenteen osuudet ja liikennetiheydet. HCM:n moottoritien linjaosuuden liikennemäärä-nopeusriippuvuuden yhtälöä sovitettiin aineistoon regressioanalyysillä. Tarkastelu suoritettiin kahdessa osassa. Ensimmäisessä tarkastelussa aineisto jaoteltiin vapaan nopeuden mukaan. Toisessa tarkastelussa aineisto jaoteltiin väylän nopeusrajoituksen mukaan. Ensimmäisessä kalibroinnissa käytettiin vapaana nopeutena mittausaineistosta laskettua keskiarvoa. Henkilöautoekvivalenttina käytettiin molemmissa tarkasteluissa HCM:ssä esitettyä arvoa. Ensimmäisessä tarkastelussa estimoitavina parametreina olivat liikennemäärä-keskinopeusmallin skaalauskerroin ja kuvaajan taitepiste. Toisessa tarkastelussa estimoitiin vapaan nopeus, taitepiste sekä skaalauskerroin.

HCM:n mallin parametrit estimoitiin mittausaineiston avulla. Nopeusrajoitusalueella 120 km/h liikennevirran käyttäytymisessä oli merkittäviä kaistakohtaisia eroja. HCM:ssä kuvataan oikeanpuoleinen ja vasemmanpuoleinen kaista samalla mallilla. Tässä työssä molemmille kaistoille estimoitiin oma mallinsa. 120 km/h nopeusrajoitusalueen oikean kaistan välityskyky jäi tutkimuksessa odotettua heikommaksi. Tutkimustulosten perusteella liikennemäärällä näytti olevan pienempi vaikutus liikennevirran keskinopeuteen kuin HCM:n mallissa, kun vapaa nopeus oli suuri. Tutkimustulosten mukaan HCM:n mallit riittävät kuitenkin karkeasti kuvaamaan suomalaista liikennevirtaa moottoriteiden linjaosuuksilla. Tutkimuksia HCM:n menetelmien soveltuvuudesta Suomeen on suositeltavaa toteuttaa myös muiden väylän osien osalta. LAM-pisteiden datan hyödyntäminen ei ole välttämättä suositeltavaa liikennevirran hetkellisten keskinopeuksien määrittelyssä datan laadun takia.

Avainsanat vapaa nopeus, liikennevirta, regressioanalyysi, perusyhtälö, kalibrointi

Author Mika Tuominen

Title of thesis Traffic Flow Characteristics of Freeways

Department Civil and Environmental Engineering

Professorship Transportation Engineering

Code of professorship Yhd-71

Thesis supervisor Professor Tapio Luttinen

Thesis advisor M.Sc Virpi Ojala

Date 27.05.2013

Number of pages 56+46

Language Finnish

Abstract

This research examined the macroscopic characteristics of traffic flow on basic freeway segments. The characteristics traffic flow obey the basic equation of traffic flow, in which traffic volume, average speed and traffic density are interdependent quantities. HCM, or Highway Capacity Manual, is an American publication that deals with the characteristics of traffic flow in specific parts of a transportation system. HCM's method on basic freeway segments is grounded on adjusted demand volume and adjusted free-flow speed, which determine the average speed-traffic volume relationship models.

This research intended to calibrate HCM 2010's basic freeway segment model with Finnish traffic flow. Measured data has been gathered between 2010-2012 from 42 automatic traffic measurement spots (LAM-spots) maintained by the Finnish Transport Agency. The data used in this research excludes such disturbances as accidents, roadwork, and bad weather. The data has been considered both from the perspective of measurement spots and lanes. The measured data was used to estimate harmonic average speed, traffic volume, portion of heavy vehicles and traffic density. The examination was then completed in two parts. The first part consisted of dividing the data into classes based on free-flow speed. The second examination consisted of dividing the data based on route and speed limit. The first calibration utilized the estimated average of the measured data as free-flow speed and the passenger-car equivalent (PCE) as it is presented in the HCM. The estimated parameters of the examination were the average speed-traffic volume relationship -model's scale coefficient and the chart's break point. The estimation of the second examination was of the value of free-flow speed, chart's break-point and the model's scale coefficient.

The HCM model's parameters were estimated by the measured data. In the 120 km/h speed limit area the traffic flow's behaviour showed notable lane-based differences. HCM describes both the right and the left lane with the same model. In this study, a separate model was estimated for both lanes. The right lane's capacity in the 120 km/h speed limit area was, in this research, weaker than expected. Based on the results, when the free-flow speed value was high, the traffic volume seemed to have a lesser effect to the traffic flow's average speed than in the HCM model. According to the results, however, the HCM models are roughly adequate in describing Finnish traffic flow on basic freeway segments. It is recommended to perform more studies using HCM's methods regarding the transportation system's other segments. To use data based on LAM-spots to estimate traffic flow's average speed is not necessarily recommended, due to the data's quality.

Keywords free-flow speed, traffic flow, regression analysis, function, calibration

Alkusanat

Tämä työ on tehty Aalto-yliopiston yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitoksella. Liikennevirasto on rahoittanut tutkimusta. Tutkimus on suoritettu Mika Tuomisen diplomityönä, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Haluan esittää kiitokseni työtä ohjanneille professori Tapio Luttiselle ja DI Virpi Ojalalle sekä Åsa Enbergille, joka avusti datan hankinnassa. Haluan kiittää myös Liikennevirastoa työn rahoittamisesta sekä Sito Oy:tä tuesta, joka mahdollisti minulle aikaa työni loppuun saattamiseen. Kiitos kuuluu myös avopuolisolleni Inkeri Ylimäelle ja kannustavalle perheelleni. Kiitoksen sanan haluan esittää myös kilpailuhenkeä ja motivaatiota herättäneillä samaan aikaan lopputöitään pakertaneille ystäväilleni.

Espoo 27.5.2013

Mika Tuominen

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	9
1.1	Työn tausta ja tavoitteet	9
1.2	Tutkimusaineistot ja -menetelmät	10
2	Moottoriteiden liikennevirran ominaispiirteet.....	12
2.1	Moottoritien määritelmä.....	12
2.2	Staattinen liikennevirranmalli	13
2.3	Liikennevirran päätyypit	14
3	Moottoritien liikennevirran laskennalliset määrittelyt HCM:n mukaan	16
3.1	Palvelutaso ja mittarit	16
3.2	Liikennemäärän ja nopeuden riippuvuus.....	19
3.3	Laskennallinen liikennemäärä	20
3.4	Vapaa nopeus	20
3.5	Henkilöautoekvivalentti	22
4	Moottoriteiden liikennevirran ominaisuuksien tutkimukset Suomessa.....	24
5	Moottoriteiden tutkimuksia ja menetelmiä ulkomailla.....	26
5.1	Saksalainen menetelmä	26
5.2	Yhdysvallat – Highway Capacity Manual.....	28
5.3	Australialainen liikennevirtatutkimus	29
5.1	Ruotsalaiset käytännöt.....	32
6	Tutkimusaineisto ja -menetelmä.....	33
6.1	Mittauspisteet	33
6.2	Liikennetiedon käyttö.....	35
6.3	Sää- ja kelitietoaineisto	35
6.4	Tietyö- ja häiriöaineisto.....	36
6.5	Tutkittavat ominaisuudet ja määritelmät	37
6.6	Regressiokäyrän määrittäminen	39
7	Tutkimustulokset	41
7.1	Liikennevirran käyttäytyminen	41
7.2	Liikennemäärä-nopeuskuvaajat vapaan nopeuden mukaan	42
7.3	Liikennemäärä-nopeuskuvaajat tieosuuden nopeusrajoituksen mukaan.....	45
7.4	Mallien sovellettavuus.....	48
8	Johtopäätökset	51
8.1	Yhteenveto.....	51
8.2	Päätelmät	52
8.3	Suositukses.....	53
	Lähdeluettelo.....	54
	Liiteluettelo	56

Määritelmät

Epävakaa liikennevirta: liikennevirran tila, kun liikennetiheys on suurempi tai yhtä suuri kuin kriittinen tiheys (TRB 2010).

Harmoninen keskinopeus: nopeuksien käänteislukujen aritmeettisen keskiarvon käänteisluku (Luttinen 2005).

Henkilöautoekvivalentti: kerroin, jonka avulla raskaan liikenteen vaikutus voidaan muuttaa henkilöautoliikennemääräksi. (TRB 2010).

Kriittinen nopeus: keskimääräinen matkanopeus kriittisen tiheyden vallitessa

Kriittinen tiheys: välityskykyä vastaava liikennetiheys (Luttinen 2005)

Laskennallinen liikennemäärä: sekaliikenteestä laskettu henkilöautoliikennemäärä (TRB 2010)

Liikennevirran perusyhtälö: ilmaisee liikennevirran nopeuden, tiheyden ja liikennemäärän välistä riippuvuutta (Luttinen 2005)

Liikennevirta: koostuu väylällä tai sen osalla kulkevista liikenneyksiköistä (Luttinen 2005)

Makroskooppinen liikennevirtateoria: käsittelee väylän tai sen osan liikennevirran keskimääräisiä ominaisuuksia ja niiden muutoksia ajan ja paikan suhteen (Luttinen 2005)

Palvelutaso: liikenteen sujuvuuden mittareihin perustuva laadun määritelmä

Raskaan liikenteen vaikutuskerroin: kerroin, joka sisältää henkilöautoekvivalentin. Kertoimella muutetaan sekaliikenne vastaamaan laskennallista henkilöautoliikennemäärää (TRB 2010)

Skaalauskerroin: termiä on käytetty tässä tutkimuksessa kuvaamaan liikennemäärä-keskinopeusmallin kuvaajan terävyyttä ja aukeamissuuntaa

Taitepiste: moottoriteiden liikennemäärä-keskinopeuskuvaajien lineaarisen osuuden päättymispiste

Vakaa liikennevirta: liikennevirran tila, kun liikennetiheys on pienempi kuin kriittinen tiheys (TRB 2010)

Vapaa nopeus: keskimääräinen matkanopeus, kun liikennevirta kulkee sille ominaista tavoitenopeutta (TRB 2010)

Välityskyky: suurin liikennemäärä, joka vallitsevissa olosuhteissa voi ohittaa tietyn tienkohdan aikayksikössä.

Lyhenteet

LAM	=	Liikenteen automaattinen mittausjärjestelmä
HBS	=	Handbuch Für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
TRB	=	Transportation Research Board
HCM	=	Highway Capacity Manual
NRC	=	National Research Council

Symbolit

Symboli	Selite
v_n	kriittinen nopeus (km/h)
q	mitattu liikennemäärä (ajon/h)
k	liikennetiheys (ajon/km/kaista)
v	liikennevirran keskinopeus (km/h)
q_e	laskennallinen liikennemäärä (henkilöautoa/h)
P_R	raskaan liikenteen osuus
E_R	raskaan ajoneuvon henkilöautoekvivalentti
a	skaalauskerroin
q_0	taitepisteen liikennemäärän arvo (henkilöautoa/h)
v_f	vapaan nopeus (km/h)

1 Johdanto

1.1 Työn tausta ja tavoitteet

Tutkimuksessa tarkastellaan moottoriteiden linjaosuuksien liikennevirran ominaisuuksia makroskooppisen liikennevirtateorian pohjalta. Nykyisin Suomessa on käytettä pääosin ulkomaalaisia malleja, joista yhdysvaltalaisen julkaisun HCM Highway Capacity Manualin mallit ovat olleet käytetyimpiä. Ulkomaalaisia malleja on käytetty katu- ja tieverkon mitoituksessa sekä toimivuusanalyysissä.

Lähtökohtana työssä on selvittää, poikkeako suomalaisen mittaustietoon perustuva liikennemäärän ja nopeuden riippuvuus ulkomaalaisissa menetelmissä käytetyistä malleista ja kertoimista. Tutkimus ja sen päätelmät vastaavat kysymykseen, minkälaisia malleja suomalaisen moottoritien välityskyvylle tulee käyttää.

Merkittävä osa tutkimuksesta keskittyy yhdysvaltalaisiin tutkimuksiin perustuvien HCM-menetelmien soveltuvuuden arviointiin suomalaisen liikennevirran kuvaamisessa. HCM-menetelmien palvelutason mittarit perustuvat suureksi osaksi yhdysvaltalaisen liikennevirran käyttäytymiseen.

Monessa maassa käytetään ulkomaisia menetelmiä, eikä malleja ole kalibroitu paikallisiin olosuhteisiin sopiviksi. Liikennevirran malleja on kehitelty erilaisiin kriteereihin perustuen eri maissa. Erimaalaisilla tutkimuksilla on eroja esimerkiksi raskaan liikenteen vaikutuksen ja tieosuuden pituuskaltevuuden huomioonottamisessa. Tämä johtuu paikallisesti vallitsevista olosuhteista, kuten lainsäädännöstä sekä maanpinnan muodoista.

Väylän tai sen osan palvelutason määrittelyyn käytetään useita erilaisia mittareita. Tässä työssä tarkastellaan moottoritien palvelutasoa liikennevirran perussuureiden näkökul-

masta. Työssä ei oteta kantaa muihin palvelutason määritelmiin. Yhteiskunnallinen ja koettu palvelutaso eivät sisälly tähän työhön.

Tutkimuksen tavoitteena on määrittää moottoriteiden liikennevirran liikennemäärän ja keskinopeuden riippuvuuden malli suomalaisissa olosuhteissa. HCM:ssä moottoriteiden linjaosuuksille esitettyä mallia kalibroidaan Suomessa mitatun liikennetiedon avulla. Mallin kalibroinnissa selvitetään suomalaiseen liikennevirtaan sopivat parametrit, joita ovat vapaa nopeus sekä mallin skaalauskerroin ja taitepiste. Liikennemallien arvioinnin yhteydessä työssä on arvioitu erilaisten liikennetietoaineistojen laatua ja soveltuvuutta tutkimukseen. Työn tavoitteena on ollut löytää jatkotutkimuskohteita sekä testata menetelmiä liikennevirran ominaisuuksien mallintamiseen.

Epävakaan ja ruuhkautuneen liikennevirran tarkastelu ei sisälly tähän työhön. Tutkimuksessa käytettävistä mittaustiedoista on karsittu pois kaikki häiriötekijät, jotka aiheuttavat vääristymää väylän teoreettiseen välityskykyyn nähden. Tutkimuksen painopiste on liikennevirran ominaisuuksissa. Tarkastelussa on pyritty löytämään optimaalinen häiriötön tarkasteluympäristö, jossa ei synny onnettomuuksista, tietöistä tai huonosta ajosäästä johtuvaa viivettä. Tarkastelussa raskas liikenne on muutettu korjauskertoimella henkilöautoliikennettä kuvaavaksi liikennemääräksi. Tämä luo mahdollisuuden selvittää liikennevirran yleisen mallin, josta välityskyky voidaan laskea käyttäen raskaan liikenteen korjauskerrointa.

1.2 Tutkimusaineistot ja -menetelmät

Työn pohjana olevat aineistot on saatu Liikenneviraston liikenteen automaattisilta mitausasemilta (LAM-asemilta). Tutkimuksessa on tarkasteltu yhteensä 42 LAM-pisteen tuottamia liikennetietoja. Pisteet mittaavat hetkellistä nopeutta sekä ajoneuvoyksiköiden määrää ja tyyppiä. LAM-pisteet on valittu niiden sijainnin, liikennemäärän ja tieosuudella valitsevan nopeusrajoituksen mukaan.

Tutkimuksessa lasketaan mittausasemakohtaisesti tarkastelujakson ajoneuvojen nopeuksien harmoninen keskiarvo (km/h), liikennemäärä ajoneuvoina tunnissa (ajon/h) sekä raskaan liikenteen osuus.

Mittausaineiston dataa käsitellään Matlab-ohjelmistolla. Liikennevirran mallien parametreja estimoidaan regressioanalyysillä. Regressioanalyysi on epälineaarinen ja sen yhtälö jäljittelee HCM:n menetelmissä käytettyjä yhtälöitä. Regressioanalyysissä määritellään oikean ja vasemman kaistan vapaa nopeus, käyrän taitepiste sekä skaalauskerroin yhtälön estimoitavina kertoimina. Regressioanalyysissä liikennemäärä toimii selittävänä muuttujana ja keskinopeus selitettävänä muuttujana. Raskaan liikenteen osuus on tunnettu muuttuja, joka laskettiin HCM:ssä esitetyn henkilöautoekvivalentin mukaan. Työssä tehtiin kaksi regressioanalyysitarkastelua. Ensimmäisessä tarkastelussa jaoteltiin aineisto vapaan nopeuden mukaisiin luokkiin. Toisessa tarkastelussa aineisto jaoteltiin väylän nopeusrajoituksen mukaan.

2 Moottoriteiden liikennevirran ominaispiirteet

2.1 Moottoritien määritelmä

Valtioneuvoston asetuksessa 924/2005 maanteistä 1 artiklassa 1 momentissa on määritetty moottoritie seuraavasti:

”Moottoritiellä on kaksi keskikaistan tai kaiteen toisistaan erottamaa ajorataa, joilla ei ole avattavia siltoja. Risteävän liikenteen tulee kulkea eri tasossa kuin moottoriteliikenteen. Moottoritiehen liittyvä ja sieltä poistuva liikenne on johdettava moottoritien alkamis- tai päättymiskohtien taikka tiesuunnitelmassa osoitettujen liittymien kautta. Moottoritien ja siihen rajoittuvan kiinteistön välillä ei saa olla muuta kulkuyhteyttä” (Finlex 2005).

Määritelmä perustuu Wienin tieliikennesopimukseen. Wienin sopimukseen mukaan moottoritien alkaminen ja päättymisen tulee osoittaa moottoritien liikennemerkillä (Wienin tieliikennesopimus (SopS 30/1986, 1 artikla. J-kohta). Wienin tieliikennesopimuksen mukaan muutoin moottoritien määritelmän ehdot täyttävä tie ei ole moottoritie, jos sitä ei ole osoitettu liikennemerkkein (mm. Kehä I). Suomessa moottoriteiden nopeusrajoitukset ovat 80 km/h, 100 km/h ja 120 km/h.

Suomessa moottoriteitä oli vuoden 2011 Liikenneviraston tilastokatsauksen mukaan 779 kilometriä. Suurin osa Suomen moottoriteistä on valtatieosuuksilla (vt 1, vt 2, vt 3, vt 4, vt 5, vt 6, vt 7, vt 8, vt 9, vt 12, vt 25, vt 29), mutta myös kantateilla (kt 45, kt 51) sekä yhdystiellä (yt 3495) on moottoritieksi määriteltyjä osuuksia. (Liikennevirasto 2011.)

2.2 Staattinen liikennevirranmalli

Liikennettä tarkastellaan staattisena liikennevirtana, jossa liikennevirran ominaisuudet pysyvät koko tarkasteluajan samanlaisina. Liikennevirran perusyhtälön suureita ovat liikennemäärä, liikennetiheys ja liikennevirran keskinopeus. Kaavassa 2.1 on esitetty liikennevirran yhtälö. (Luttinen 2005.)

$$q = kv \quad (2.1)$$

missä,

q = liikennemäärä (ajon/h)

k = liikennetiheys (ajon/km)

v = liikennevirran keskinopeus (km/h)

Pistemittautietoa käytettäessä liikennevirran yhtälössä keskinopeutena tulee käyttää ajoneuvojen pistenopeuksien harmonista keskiarvoa. Kaava 2.2 on pistemittauksessa käytettävä harmonisen keskinopeuden yhtälö. (Luttinen 2005.)

$$v = \frac{q}{k} = \frac{n/T}{\frac{1}{T} \sum_{j=1}^n \frac{1}{v_j}} = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{v_j}} \quad (2.2)$$

Yhtälön kuvaaja tarvitsee reunaehtoja kuvatakseen luotettavasti liikennevirran käyttäytymistä. Liikennevirran kuvaajien on täytettävä seuraavat reunaehdot:

1. Kun liikennetiheys on $k = 0$, myös liikennemäärä on $q = 0$
2. Kun liikennetiheys on suurimmillaan, ajoneuvot eivät liiku, joten $v(k_{\max})$ on oltava 0, tällöin myös $q(k_{\max}) = 0$.
3. Kriittinen tiheys vastaa väylän suurinta liikennemäärää, mikä osoittaa väylän välyskyvyn C .

4. Kun liikennemäärä lähestyy nollaa, ajoneuvojen välinen vuorovaikutus häviää ja ajoneuvot kulkevat tavoitenopeuttaan. Tätä nopeutta kutsutaan vapaaksi nopeudeksi. Tällöin:

(2.3)

$$\lim_{k \rightarrow 0} \frac{dq(k)}{dk} = \lim_{k \rightarrow 0} \bar{v}(k) = v_v$$

5. Alhaisilla liikennetiheyksillä liikennemäärä ei vaikuta liikennevirran nopeuteen. Tällöin pätee:

(2.4)

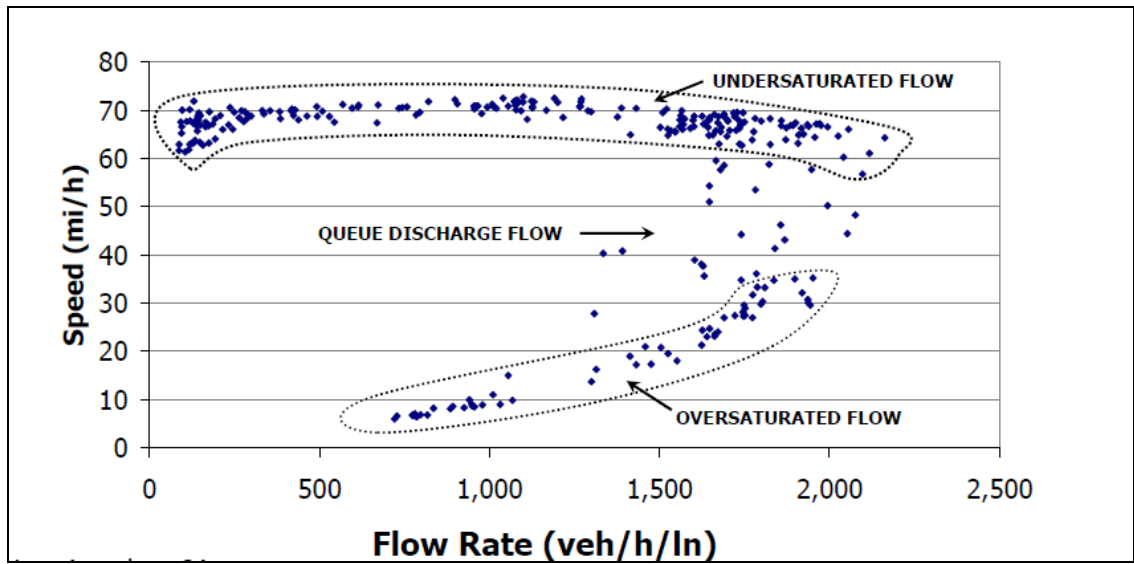
$$\lim_{k \rightarrow 0} \frac{dv(k)}{dk} = \lim_{k \rightarrow 0} \frac{d^2q(k)}{dk^2} = 0$$

Reunaehtojen perusteella liikennevirran mallin merkittäviä parametreja ovat välityskyky, kriittinen tiheys, vapaa nopeus sekä maksimitiheys. (Luttinen 2005.)

2.3 Liikennevirran päätyypit

Liikennevirta voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin, vakaa liikennevirta, jonosta purkautuva liikennevirta sekä epävakaa liikennevirta. Vakaa liikennevirta kuvaa tilannetta, jossa liikennevirtaan ei kohdistu pullonkaulan vaikutuksia. Jonon purkuvirrassa liikenne on ohittanut pullonkaulan ja on kiihdyttämässä vapaaseen nopeuteen. Epävakaa liikennevirta kuvaa tilannetta, jossa liikenne on saapumassa pullonkaulaan. Nopeus laskee huomattavasti, koska liikenne on ruuhkautunut. (TRB 2010.)

Kuvassa 1 esitetty tilanne kuvaa tapausta, jossa moottoritieosuudella on sattunut jokin häiriötä aiheuttava tapahtuma, joka on synnyttänyt pullonkaulan. Tilannetta ei voida käyttää yleistetyn liikennemäärä-nopeusriippuvuusmallin luomiseen. Tilanne kuvaa ruuhkautuneen liikenteen toimintaa. Ruuhkautunut tilanne aiheuttaa häiriöitä kaistakapasiteetin tutkimiseen, koska epävakaasta tilanteesta kiihdyttävät ajoneuvot häiritsevät liikennemäärä-keskinopeusriippuvuuden arviointia. (TRB 2010.)



Kuva 1 Liikennevirran päätyyppien havaintoalueet (TRB 2010).

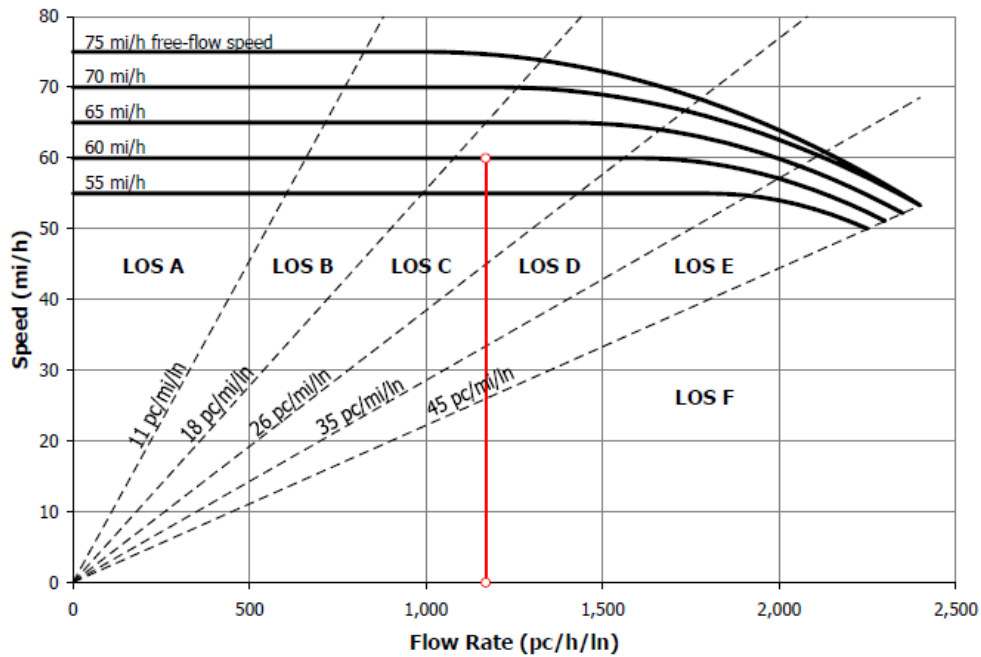
3 Moottoritien liikennevirran laskennalliset määrittelyt HCM:n mukaan

3.1 Palvelutaso ja mittarit

Suomessa moottoriteiden palvelutaso määritellään usein HCM:n (Highway Capacity Manual) menetelmien mukaisilla mittareilla. Palvelutaso voidaan määritellä kolmen suureen mukaan, joita ovat liikennetiheys, keskimääräinen matkanopeus ja välityskyvyn käyttösuhde. Moottoritien linjaosuuksilla käytetyin ja luotettavin palvelutasomittari on liikennetiheys. HCM:ssä määritelty kriittisen liikennetiheyden raja on 28 ha/km/kaista, mikä määritellään sekaliikenteestä lasketulla henkilöautoliikennemäärällä. (TRB 2010.)

HCM:ssä määritellään moottoritien palvelutaso erikseen erityyppisille tieosuuksille. Väylän kokonaispalvelutaso määritetään väylän osien palvelutasomittareiden keskiarvona. HCM:ssä on moottoritien linjaosuuksista eroteltu osuuksista, joissa esiintyy liittyvää liikennettä sekä sekoittuvaa liikennettä. Liittyvälle sekä sekoittuvalle liikenteelle on HCM:ssä esitetty omat laskentamenetelmät. (TRB 2010.)

HCM 2010 -julkaisussa esitetyssä liikennemäärän (flow rate) ja keskinopeuden riippuvuutta esittävässä käyrästä on viisi kuvaajaa (kuva 2). Kuvaajille on määritelty taitepiste, joka kertoo mihin asti liikennevirran nopeus pysyy vakiona (vapaassa nopeudessa). Taitekohdan jälkeen kuvaajat alkavat kaartua alaspäin ja liikennevirran nopeus alenee. (TRB 2010.)



Kuva 2 HCM 2010:n laskennallisen liikennemäärä-keskinopeuskuvaajat palvelutasorajoiheen (TRB 2010).

Kuvaajat eivät ota suoraan huomioon tarkastelutilanteen olosuhteita. Tarkastelukohteen olevan moottoritieosuuden olosuhteiden vaikutus otetaan huomioon laskennallisen henkilöautoliikennemäärän sekä vapaan nopeuden määrittämisen yhteydessä. Lasketun vapaan nopeuden arvon avulla valitaan yksi HCM:ssä esitetyistä viidestä kuvaajasta, josta voidaan laskennallisen liikennemäärän avulla selvittää liikennevirran keskimääräinen nopeus sekä palvelutaso. (TRB 2010.) Taulukossa 1 on esitetty HCM 2010 -menetelmään perustuvat laskennallisen henkilöautoliikennemäärän raja-arvot palvelutasoittain.

Taulukko 1 Moottoriteiden linjaosuuksien laskennallinen liikennemäärä (TRB 2010).

FFS (mi/h)	Target Level of Service				
	A	B	C	D	E
75	820	1,310	1,750	2,110	2,400
70	770	1,250	1,690	2,080	2,400
65	710	1,170	1,630	2,030	2,350
60	660	1,080	1,560	2,010	2,300
55	600	990	1,430	1,900	2,250

NOTE: All values rounded to the nearest 10 pc/h/ln.

Liikennevirran tiheyden ja palvelutason määrittämiseksi HCM-menetelmässä tarvitaan tiedot tien geometriasta (piennarleveys, kaistaleveys, pituuskaltevuus), liikennemääräs-

tä, määritetystä vapaasta nopeudesta, raskaan liikenteen osuuksista sekä kaistamääristä. HCM:n menetelmässä käytetään väylän vapaan nopeuden laskemiseen myös ramppitiheyttä kuvaavaa arvoa. HCM:n mukaan paras palvelutason mittari moottoritien linjaosuudella on liikennetiheys. Tiheys k määritellään liikennevirran laskennallisen liikennemäärän q_s ja keskinopeuden v osamääränä (kaava 3.1). (TRB 2010.)

Taulukko 2 HCM:ssä määritetyt palvelutasorajat liikennetiheydelle moottoriteiden linjaosuuksilla. Taulukossa raja-arvot on esitetty yksikössä henkilöautoa maililla (pc/mi/ln) (TRB 2010).

Level of Service	Density (pc/mi/ln)
A	≤ 11
B	$> 11-18$
C	$> 18-26$
D	$> 26-35$
E	$> 35-45$
F	Demand exceeds capacity > 45

Palvelutaso voidaan tarkistaa myös suoraan kuvaajasta, kun oikea kuvaaja sekä laskennallinen liikennemäärä on määritetty. Kun laskennallinen liikennemäärä on selvitetty, voidaan kuvasta 2 määrittää liikennevirran nopeus sekä palvelutaso. HCM:n kuvaajat eivät kuvaa epävakaan liikennevirran toimintaa. (TRB 2010.)

Liikennevirran tiheys voidaan määritellä yhtälöllä, jossa q_s on laskennallinen liikennemäärä ja v on liikennevirran keskinopeus. Liikennevirran liikennemääränopeuskuvaajaan voidaan piirtää palvelutasoja vastaavat rajat. Kaava 3.1 on tiheyden yhtälö.

$$k = \frac{q_s}{v} \quad (3.1)$$

HCM -menetelmän mukainen palvelutason määrittäminen on kuusiportainen prosessi:

1. Lähtötietojen hankinta
2. Vapaan nopeuden määrittäminen
3. Oikean mallin valitseminen
4. Laskennallisen liikennemäärän määrittäminen
5. Nopeuden ja liikennetiheyden laskeminen
6. Palvelutason määrittäminen (TRB 2010.)

3.2 Liikennemäärän ja nopeuden riippuvuus

HCM:ssä on esitetty käyrästä, johon on määritelty liikennemäärän ja nopeuden riippuvuuden kuvaajat viidelle vapaalle nopeudelle. Tieosuuden paikallisten olosuhteiden vaikutukset määritellään laskentakaavoissa tarkasteltavalle väylälle laskennallisen välityskyvyn ja laskennallisen liikennemäärän kautta. Laskennalliset arvot välityskyvylle ja liikennemäärälle saadaan olosuhteita kuvaavien korjauskertoimien avulla. (TRB 2010.)

Kuvaajille on määritelty yhdysvaltalaisissa kenttätutkimuksissa empiirisesti taitepiste (Break-Point), jossa liikennemäärä on kasvanut niin, että liikennevirran nopeus alkaa laskea vapaasta nopeudesta. Jokaiselle viidelle kuvaajalle on määritelty oma taitepiste.

Taulukko 3 Liikennemäärä-nopeusmallin yhtälön ja määritelmät. Taulukossa esitetty v_p on laskennallinen liikennemäärä (TRB 2010).

FFS (mi/h)	Break-Point (pc/h/ln)	Flow Rate Range	
		$\geq 0 \leq \text{Break-Point}$	$> \text{Break-Point} \leq \text{Capacity}$
75	1,000	75	$75 - 0.00001107 (v_p - 1,000)^2$
70	1,200	70	$70 - 0.00001160 (v_p - 1,200)^2$
65	1,400	65	$65 - 0.00001418 (v_p - 1,400)^2$
60	1,600	60	$60 - 0.00001816 (v_p - 1,600)^2$
55	1,800	55	$55 - 0.00002469 (v_p - 1,800)^2$

Mikäli tarkastelukohteena olevan väylän ominaista vapaata nopeutta (FFS) ei ole mainittu taulukossa 3, silloin käytetään lähimmäksi osuvaa arvoa vastaavaa kuvaajaa. Kun laskennallinen liikennemäärä ylittää taitepisteen arvon, kuvaaja taittuu alaspäin kaavan 3.2 mukaisesti. (TRB 2010.)

$$v = v_f - a \times (q_e - q_0)^2 \quad (3.2)$$

Yhtälössä v tarkoittaa liikennevirran keskinopeutta, v_f on taulukosta 3 valittu vapaan nopeuden arvo, a on skaalauskerroin, q_0 on taitepiste ja q_e on laskennallinen liikennemäärä (henkilöautoa/h). HCM:ssä esitetyt arvot ja yhtälöt kuvaavat keskimääräistä liikennettä väylän osalla. HCM:n malli ei erottele vasemman ja oikean kaistan liikennevirran ominaisuuksia. (TRB 2010.)

3.3 Laskennallinen liikennemäärä

HCM:n laskennallisen liikennemäärän (q_s) yhtälö (3.3) muodostuu sekaliikennemäärästä (q) ja erilaista olosuhdekertomista. Laskennallista liikennemäärää tarvitaan käytösuhteen, liikennetiheyden ja liikennevirran keskinopeuden määrittämiseen. Laskennallinen liikennemäärä lasketaan sekaliikennemäärän avulla. Sekaliikennemäärä jaetaan olosuhdekertoimilla, joita ovat huipputuntikerroin (PHF), kaistamäärä (N), raskaan liikenteen korjauskerroin (f_{HV}) sekä liikenneympäristön tuttuudesta kertova korjauskerroin (f_p). (TRB 2010.)

(3.3)

$$q_s = \frac{q}{PHF * N * f_{HV} * f_p}$$

HCM:n menetelmässä on käytetty yleensä huipputuntikertoimen (PHF) (peak hour factor) lukuarvona 0,92. N tarkoittaa moottoritien linjaosuuden kaistojen lukumäärää. Kaistamäärä sisällytetään kaavaan 3.3, kun lähtöarvoina käytetään koko ajoradan liikennemäärää. (TRB 2010.)

Laskennallisessa liikennemäärässä raskaan liikenteen osuuden vaikutus otetaan huomioon raskaan liikenteen korjauskertoimessa. Liikenneympäristön tuttuutta tienkäyttäjille on hankala arvioida ja sen vuoksi kerrointa f_p ei käytetä, jos tarkempaa erillistä tutkimusta ei ole tehty. (TRB 2010.)

3.4 Vapaa nopeus

Vapaa nopeus on keskeinen tekijä moottoritien liikennevirran ominaisuuksien tarkastelussa. Vapaa nopeus saavutetaan tilanteessa, jossa muut tienkäyttäjät eivät rajoita liikenneyksikön nopeutta. Vapaa nopeus voidaan määrittää kenttämittauksella tai yleistyillä estimaateilla.

Suomessa on käytössä oma menetelmä vapaan nopeuden määrittämiseksi. Vapaan nopeuden arvoja hyödynnetään tiehankkeiden investointikustannusselvityksissä. Liiken-

nevirasto on julkaissut ”Tieliikenteen ajokustannusten laskenta 2010” -julkaisun, jossa on esitetty malli vapaan nopeuden laskemiseen. Vapaan nopeuden laskentakaava on esitetty kaavassa 3.4.

(3.4)

$$V_T = a + b \times V_{raj} + c \times V_{raj} / 80 \times Pl$$

V_T = tavoitenopeus vapaissa oloissa eri ajoneuvoryhmille

Pl = päällysteen leveys

a, b ja c = päällysteen leveydestä ja ajoneuvotyypistä riippuvia vakioita

V_{raj} = tieosuuden nopeusrajoitus

(Ristikartano 2010.)

Ristikartanon esittämää vapaan nopeuden kaavaa käytetään IVAR-ohjelmistolla suorite-
tuissa laskennoissa matkanopeuden määrittämiseen, liittymien aiheuttaman viiveen las-
kemiseen sekä näistä johtuvien kustannusten tunnuslukujen määrittämiseen. IVAR on
investointihankkeiden vaikutusten arviointiohjelmisto. (Ristikartano 2010.)

HCM 2010:n menetelmässä moottoriteillä käytetään kaavaa 3.5. Kaavassa f_{LC} on oikean
puolen sivueste-etäisyyden korjaustekijä ja f_{LW} kaistan leveyden korjaustekijä. Korjaus-
tekijöiden arvot saadaan HCM:ssä esitetyistä taulukoista vapaan nopeuden alenemana
(mi/h). TDR tarkoittaa ramppitiheyttä (ramppeja/mi). Kaava on johdettu mittaustietojen
avulla, joita on kerätty Yhdysvalloissa vuonna 2008. (TRB 2010.)

(3.5)

$$FFS = 75.4 - f_{LW} - f_{LC} - 3.22 TRD^{0.84}$$

Jos vapaa nopeus määritellään kenttämittauksilla, siihen ei tarvitse tehdä korjauksia
kaavassa 3.5 esitetyillä kertoimilla. Vapaa nopeus voidaan määrittää liikennevirran mit-
tausaineistosta, kun liikennemäärä on alle 1000 ajoneuvoa/h/kaista (TRB 2010). Austra-
lialaisessa kenttätutkimuksessa käytettiin rajana 1600 ajoneuvoa/h vapaan nopeuden
määrittelyyn (Akcelik 1999). Vapaa nopeus on myös mahdollista selvittää mittausai-
neistosta liikennemäärän ja keskinopeuden regressioanalyysin estimointikertoimena.

3.5 Henkilöautoekvivalentti

Todellinen liikennemäärä tarkoittaa sekaliikennettä, joka sisältää henkilöautoja, linja-autoja, kuorma-autoja, matkailuautoja sekä pakettiautoja. Henkilöautoekvivalentin tehtävä on muuttaa sekaliikenne vastaamaan vaikutukseltaan vastaavaa laskennallista henkilöautoliikennemäärää. Tämä tarkoittaa, että laskennallinen liikennemäärä on sitä suurempi, mitä suurempi on raskaan liikenteen osuus. (Luttinen 2001.)

Henkilöautoekvivalentin käyttö mahdollistaa erityyppisistä ajoneuvoista koostuvien liikennemäärähavaintojen analysoimisen. HCM:n mukaan rekkojen- ja linja-autojen ekvivalenttiarvo (E_T) tasaisella linjaosuudella on 1,5 ja matkailuautojen arvo on (E_R) 1,2. Raskaan liikenteen korjauskerroin voidaan määritellä kaavalla 3.6. (TRB 2010.)

(3.6)

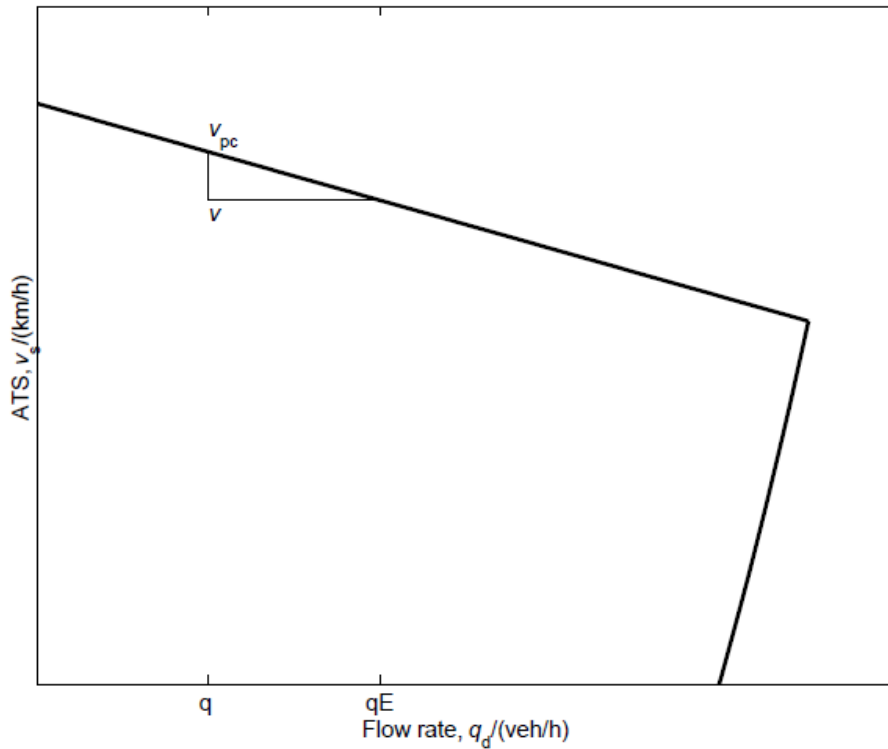
$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1)}$$

Kaavassa P_T tarkoittaa bussien ja kuorma-autojen osuutta liikenteestä. P_R kuvaa matkailuautojen osuutta liikenteestä. Kun raskaan liikenteen osuus yleistetään kattamaan linja-autot, kuorma-autot ja matkailuautot, voidaan yhtälöissä käyttää ainoastaan yhtä raskaan liikenteen osuutta.

(3.7)

$$q_s = q * (1 + P_T * (E_T - 1))$$

Kaavassa 3.7 on esitetty laskennallisen liikennemäärän määrittäminen raskaanliikenteen henkilöautoekvivalentin avulla. Kaavassa q_s on laskennallinen liikennemäärä. Kaavassa P_T vastaa koko raskaan liikenteen osuutta kokonaisliikenteestä. Vastaavasti E_T tarkoittaa koko raskaan liikenteen henkilöautoekvivalenttia.



Kuva 3 Henkilöautoekvivalentin määrittäminen keskinopeuden mukaan. Vaaka-akseli kuvaa liikennemäärää ja pystyakseli keskimääräistä matkanopeutta (Luttinen 2001).

Henkilöautoekvivalentti voidaan määrittää liikennemäärän ja keskinopeuden riippuvuuden mallin avulla (kaava 3.8), missä \bar{v}_s on kuvaajan kulmakerroin, v on sekaliikenteen keskinopeus ja v_{pc} on henkilöautoliikenteen keskinopeus. (Luttinen 2001.)

(3.8)

$$E_T = 1 + \frac{v - v_{pc}}{\bar{v}_s * P_T * q}$$

Kaikissa menetelmissä henkilöautoekvivalenttia ei käytetä. Saksalaisen liikenteen välityskykykäsikirjan (HBS) menetelmissä ei käytetä erillistä henkilöautoekvivalenttia vaan liikennevirta ilmoitetaan liikenteen kokonaismääränä. HBS:ssä on esitetty liikennemäärän ja keskinopeuden riippuvuuden kuvaajat eri raskaan liikenteen osuuksien mukaan. (Brilon 2003a.)

4 Moottoriteiden liikennevirran ominaisuuksien tutkimukset Suomessa

Liikennevirran ominaisuuksia on tutkittu varsin laajasti Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulun yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitoksella. Julkinen väylänpidosta vastaava organisaatio on teettänyt lukuisia palvelutasoon ja liikennevirran ominaisuuksiin liittyviä tutkimuksia. Tutkimukset ovat pääosin koskeneet perusverkon teitä ja liittymiä. Moottoriteiden välityskykyyn liittyviä tutkimuksia on viimeksi toteutettu Suomessa laajamittaisemmin 1980-luvulla. Tuolloin tutkimuskohteena toimi kantatie 51 (Länsiväylä).

Länsiväylän liikennevirran ominaisuuksia on tutkittu myös vuonna 2000, mikä käy ilmi Tielaitoksen eli nykyisen Liikenneviraston julkaisusta ”Länsiväylän automaattisen liikenteenohjausjärjestelmän vaikutukset liikennevirtaan”. Kyseessä olevassa tutkimuksessa esiteltiin olosuhteiden ja nopeusrajoituksen muutoksen vaikutuksia liikennevirran perussuureisiin. (Innamaa 2000.)

Suomessa on tutkittu kuljettajien nopeuden valintaperiaatteita moottoriteillä erilaisilla nopeusrajoitusalueilla vuonna 2000. Tutkimuksen on teettänyt Tiehallinto (nyk. Liikennevirasto). Tutkimuksessa kerättiin liikenne tietoja 12 LAM-pisteestä. Tutkimuksessa kävi ilmi, että 80 km/h nopeusrajoituksen alueella peruskaistaa ajavat kulkivat keskimäärin 9 km/h nopeammin kuin nopeusrajoitus salli. Ohituskaistalla nopeusrajoitus ylitettiin 13 km/h:lla. 100 km/h nopeusrajoituksen alueella keskinopeus oli peruskaistalla 5 km/h nopeusrajoitusta korkeampi ja ohituskaistalla 11 km/h korkeampi. 120 km/h nopeusrajoituksen alueella peruskaistalla nopeus alitti nopeusrajoituksen 7 km/h. Ohituskaistalla liikennevirta kulki lähes nopeusrajoituksen mukaan. (Mannan 2000.)

Vuonna 1998 Tielaitos eli nykyinen Liikennevirasto teetti selvityksen kaistanvaihtoista moottoriteillä. Tutkimuksissa käsiteltiin neljää kaistanvaihtomallia. Näitä olivat kenttämittauksiin perustuva makroskooppinen kaistanvaihtomalli, kuljettajien käyttäytymiseen perustuva mikroskooppinen kaistanvaihtomalli, aikavälin hyväksymiseen perustu-

va mikroskooppinen kaistanvaihtomalli sekä dynaamisen diskreetti kaistavalintamalli moottoriteille. (Innamaa 1998.)

Raskaan liikenteen vaikutuksia moottoriteiden liikennevirtaan on tutkittu Tielaitoksen julkaisussa ”Impact of Heavy Vehicles on Finnish Freeway Traffic Flow” vuonna 1998. Tutkimuksessa on hyödynnetty LAM-pistetietoa sekä mallinnettu ja simuloitu liikennetilannetta HUTSIM-ohjelmistolla. (Mannan 1998.)

LAM-pisteiden avulla on tarkasteltu kaksikaistaisia tieosuuksia Suomessa, mutta ei moottoriteiden ominaisuuksia samalla laajuudella. Moottoriteiden osalta on tutkittu viimeisen 15 vuoden aikana erilaisten olosuhteiden vaikutuksia liikennevirtaan, mutta ei ole keskitytty liikennevirran ominaisuuksiin, jotta voitaisiin tuottaa yksinkertaistettu malli moottoritien välityskyvystä.

5 Moottoriteiden tutkimuksia ja menetelmiä ulkomailla

5.1 Saksalainen menetelmä

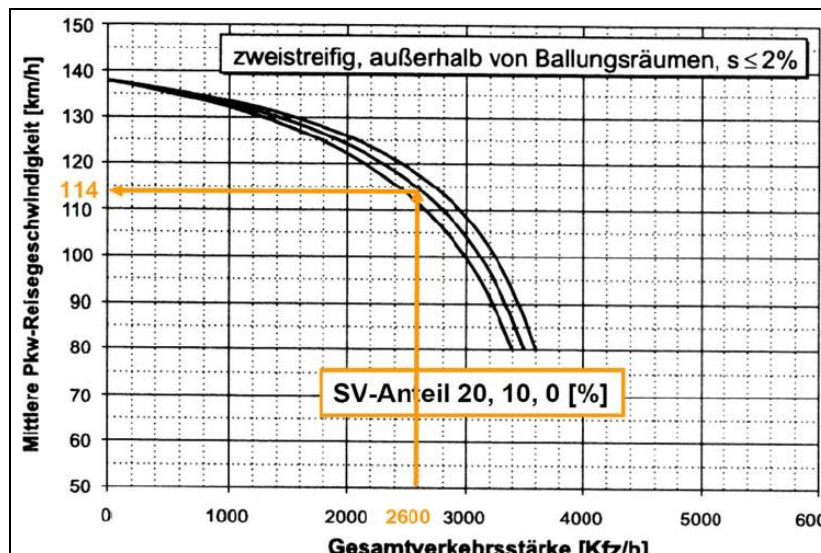
Saksassa ei käytetä suoraan yhdysvaltalaisista HCM:ään perustuvaa laskentamallia. Saksalaisilla on käytössään oma käsikirja ”Handbuch Für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen, HBS”. HBS:n menetelmät perustuvat pääosin saksalaisiin tutkimuksiin. Saksalaisessa käsikirjassa käytetään HCM:n tapaan kuusiportaista palvelutasosteikkoa, mutta HCM:stä poiketen kullekin palvelutasolle on asetettu liikennemääräraja. (HBS, 2001.)

Saksalaisen moottoritien välityskykytutkimukset ja menetelmät eroavat HCM:n menetelmistä, koska Saksassa kaikilla moottoriteillä ei ole henkilöautoliikenteen nopeusrajoituksia. Raskaan liikenteen nopeusrajoitus on 80 km/h. (Ojala ym. 2007.)

Taulukko 4 Palvelutasokriteerit moottoriteiden linjaosuuksilla saksalaisen HBS:n mukaan (Ojala ym. 2007).

Palvelu- taso	Henkilöautojen keskimääräinen hitaus (min/100 km)	Henkilöautojen keskimääräinen matkanopeus (km/h)	Liikenne- tiheys (ajon/km)	Käyttö- suhde
A	≤ 46	≥ 130	≤ 8	≤ 0,30
B	≤ 48	≥ 125	≤ 16	≤ 0,55
C	≤ 52	≥ 115	≤ 23	≤ 0,75
D	≤ 60	≥ 100	≤ 32	≤ 0,90
E	≤ 75	≥ 80	≤ 45	≤ 1
F	> 75	< 80	> 45	-

Saksassa moottoriteiden palvelutasomittarina toimii tieosuuden käytösuhde. Saksalaisessa mallissa ihannetilanteesta poikkeaville olosuhteille on kullekin oma käyränsä kuvaamaan kyseisen tilanteen liikennemäärä-nopeussuhdetta. Kuvaajissa ei ole esitetty taitekohtaa pisteeseen, jossa liikennevirta liikkuu vapaata nopeutta. Käyrä on laskeva lähtöpisteestä (liikennemäärä = 0) lähtien. (HBS 2001.)



Kuva 4 Henkilöautojen keskimääräisen matkanopeuden määrittäminen liikennemäärä-nopeuskäyrällä, kun tie on kaksikaistainen ja pituuskaltevuus on 2 % tai alle. Kuvaaja esittää koko ajosuunnan liikennemäärää. (HBS 2001.)

HBS:n mukainen menettely vastaa suurilta osin HCM:n menetelmää. Välityskyvyn ja palvelutason laskentaan käytetään samanlaisia lähtöarvoja, joita ovat nopeusrajoitus, raskaan liikenteen osuus, liikennemäärä, pituuskaltevuus sekä kaistamäärä. Näiden lisäksi laskennassa käytetään tietoja väylän poikkileikkauksesta. Laskennallinen liikennemäärä selvitetään HBS:ssä esitetyistä taulukoista raskaan liikenteen ja väylän pituuskaltevuuden perusteella. Asteikkojen väliin jäävät arvot interpoloidaan. Väylän käytösuhde määritellään laskennallisen liikennemäärän ja väylän välityskyvyn perusteella. HBS ei käytä HCM:n menetelmissä esitettyä henkilöautoekvivalenttia, vaan liikennevirran on kaikkien ajoneuvojen summa. Saksalaisessa mallissa liikennemäärä-keskinopeuskuvaajat on esitetty sekaliikenteen suhteen. Mallit on luokiteltu raskaan liikenteen osuuden mukaan. (HBS 2001.)

Liikennevirran laskennallinen nopeus tarkistetaan HBS:n nopeus-liikennemääräkäyrästä. Käytettävät käyrät valitaan tarkasteltavan tilanteen mukaan. Merkitseviä tekijöitä ovat kaistamäärä, pituuskaltevuus, raskaan liikenteen osuus sekä ympäröivä infrastruktuuri. Käyrästä on myös omia kuvaajia erikoistilanteille, kuten tunneleille ja työmaille. HBS:n ohjeiden mukaan, mikäli tieosuus koostuu monesta erilaisesta osasta, laskennalliset arvot ja palvelutaso määritellään jokaiselle osuudelle erikseen ja kokonaispalvelutaso määritetään osien pituudella painotetuilla keskiarvoilla. (HBS 2001.)

Vuonna 2003 Brilon ja Bresseler tutkivat HBS 2001:n menetelmiin tehtyjen päivitysten toimivuutta moottoriteillä. Tutkijat ovat havainneet, että uudet laskentakaavat HBS:ssä antavat pienempiä nopeuksia liikennevirralle kuin aikaisemmat mallit. (Brilon 2003)

Saksalainen kenttätutkimus suoritettiin 5 erilaisessa tilanteessa. Mittauspisteet sijaitsivat 2 ja 3,6 kilometrin etäisyyksillä toisistaan. Tutkimuksessa ei käytetty pistemittaustmenetelmää, vaan matka-aikamittausta. Mittaustieto analysoitiin ajosuuntaakohtaisesti. Nopeus määriteltiin tarkasteluissa kaavalla:

$$v = \frac{v_0}{1 + \frac{v_0}{L * (c - q)}} \quad (5.1)$$

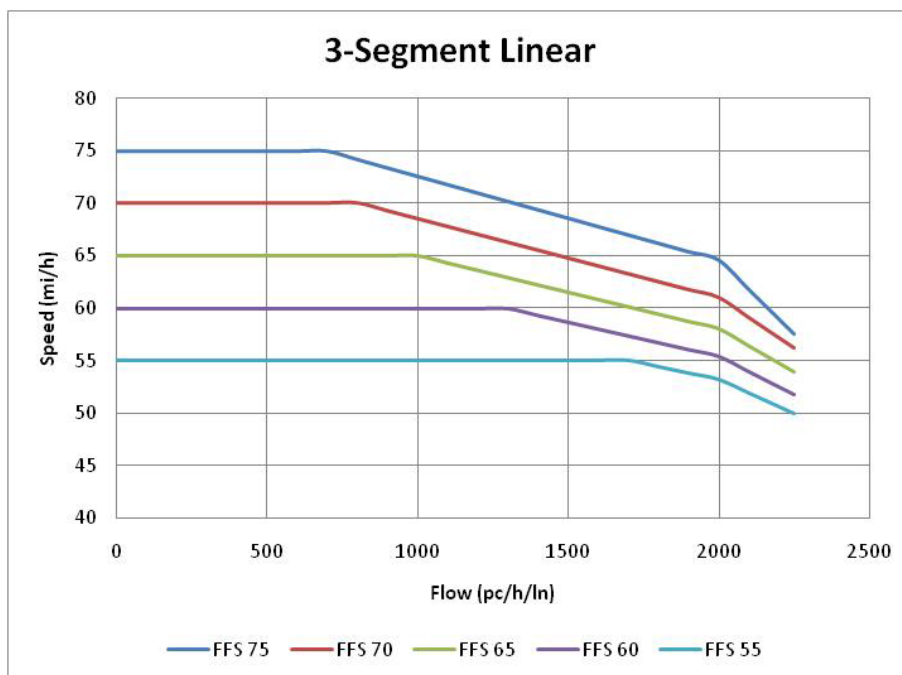
Kaavassa v_0 on vapaa nopeus, q on liikennemäärä, c on väylän käyttösuhde ja L tarkasteluvälin pituus. Kenttätutkimuksen painopiste oli pituuskaltevuuden vaikutuksessa väylän välityskykyyn. Tutkimuksessa määriteltiin pituuskaltevuuden vaikutukselle funktio. (Brilon 2003.)

5.2 Yhdysvallat – Highway Capacity Manual

Yhdysvalloissa merkittävä liikennetutkimusten tuottaja on The Transportation Research Board (TRB). TRB on yksi kuudesta Yhdysvaltain kansallisesta tutkimusneuvostosta NRC (The National Research Council). TRB toimii itsenäisenä instituutiona, jonka tarkoituksena on tuottaa tutkimusta Yhdysvaltain julkisille elimille. TRB julkaisee HCM-käsikirjaa, joka on laajin ja yleisimmin käytetty liikenteen ilmiöitä tutkiva julkaisu maailmassa. HCM-käsikirjasta on julkaistu painokset vuosina 1950, 1965, 1985, 2000 ja 2010. Käsikirja sisältää laskentamalleja ja vaikutuskertoimia teiden linjaosuuksille, sekoittumisalueille ja liittymille. Uusi HCM 2010 käsittelee liikenteen välityskykyä aikaisempia painoksia moniulotteisemmin. (TRB 2010.)

Vuonna 2009 Yhdysvalloissa tutkittiin HCM 2000 -menetelmien luotettavuutta. Tutkimuksen tarkoituksena oli kehittää menetelmiä seuraavaan HCM 2010:een. Tutkimus keskittyi moottoriteiden mallien kalibrointiin. Tutkimuksessa käytettiin 48 mittauspistettä. Tutkimus keskittyi nelikaistaisiin moottoriteihin, joissa oli kaksi kaistaa suuntaansa. (Roess 2009b.)

Tutkimuksessa 75 mi/h vapaan nopeuden kuvaajan laskevan 2000 henkilöautoa/h rajan jälkeen 70 mi/h ja 65mi/h kuvaajia nopeammin. Tutkimusaineistolla kaikilla eri vapailla nopeuksilla kuvaajien taitepisteen arvo oli pienempi kuin HCM 2000:ssa. Tutkimuksessa liikennevirta käyttäytyy taitepisteen ja 2000 henkilöautoa/h arvon välillä suoraviivaisesti ja sitä pystyttiin kuvaamaan lineaarisella kuvaajalla. Kun liikennemäärä ylitti 2000 henkilöautoa/h, keskinopeus alkoi laskea voimakkaammin. 2000 henkilöautosta tunnissa kriittiseen tiheyteen pystyttiin sovittamaan lineaarisen kuvaajan osa (kuva 5). (Roess 2009b.)

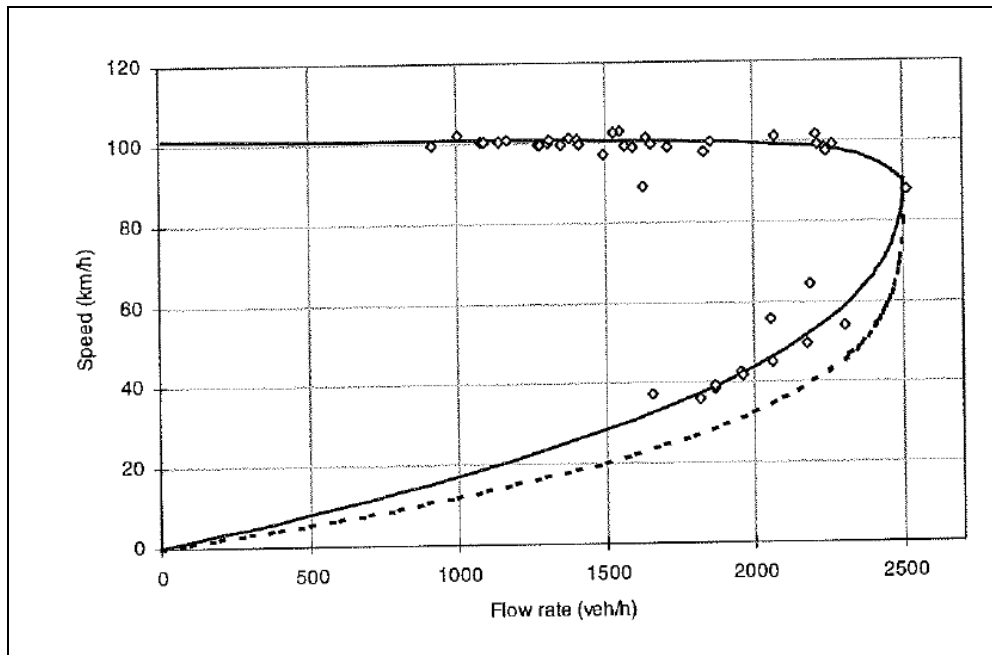


Kuva 5 Kolmen lineaarisen osan mallin kuvaajat (Roess 2009b).

Uudessa HCM 2010 julkaisussa ei kuitenkaan käytetä Roessin esittämää kolmesta lineaarisesta osuudesta koostuvaa kuvaajaa.

5.3 Australialainen liikennevirtatutkimus

Australiassa tehtiin kenttätutkimus moottoriteiden liikennevirran ominaisuuksista vuonna 1999. Tarkasteltavat aikajaksot olivat 20 s, 1 min, 2 min, 5 min ja 15 min. Selvityksessä ”Fundamental relationships for freeway traffic flows” tarkastellaan liikenneteorioiden ja liikennevirran peruskuvaajan suureiden riippuvuuksia. (Akcelik 1999.)



Kuva 6 Kenttätutkimuksilla kalibroitu liikennemäärä-nopeuskuvaaja.

Vapaa nopeus selvitetiin tutkimuksessa mittaustietoa analysoimalla. Analyysissä käytettiin alle 1600 ajoneuvon liikennemäärätoksia liikennevirran vakaassa tilassa. Tutkimuksessa todettiin vapaan nopeuden asettuvan erittäin lähelle nopeusrajoitusta. Raskaan liikenteen vaikutusta ei tutkimuksessa eroteltu, mutta sen osuus määriteltiin mittausaineistoa rajaamalla noin kolmeen prosenttiin. (Akcelik 1999.)

Tutkimuksessa testattiin kuutta erilaista mallia ja vertailtiin niitä kenttätutkimuksen tuloksien kanssa. Tutkimuksessa tuotettiin liikennevirran yhtälöitä epävakaa ja vakaa liikennevirralle. Testissä oli mukana yhtälöitä, joilla pyrittiin kuvaamaan molempia sekä epävakaa, että vakaa liikennevirtaa. Regressioanalyysi suoritettiin viiden minuutin aikajakson havainnoille. Viiden minuutin aikajakson katsottiin tässä tutkimuksessa olevan luotettavin havaintojen arviointiin. Mallien kalibroinnissa käytettiin epälineaarista regressiota. Tutkimuksissa päädyttiin kahteen malliin, jotka vastasivat mahdollisimman hyvin kenttätutkimuksen tuloksia sekä mallinsivat suureiden välisiä riippuvuuksia riittävän hyvin. (Akcelik 1999.)

Tutkimuksessa käytetyistä malleista parhaimpia tuloksia antoivat mallit, joissa epävakaa ja vakaa liikennevirta on laskettu erikseen. Epävakaa liikennevirtaa kuvasi parhaiten epävakaa liikennevirran keskinopeuden kalibroitu yhtälö 5.2. Vakaan liikennevirran keskinopeutta kuvaa yhtälö 5.3. (Akcelik 1999.)

(5.2)

$$v = v_n \left[1 - \left(1 - \frac{q}{q_n} \right)^{q_n \frac{L_{hj}}{1000 * v_n}} \right],$$

(5.3)

$$v = v_f / \left\{ 1 + 0.25 * v_f T_f \left[z + \sqrt{z^2 + \left(\frac{16 \left(\frac{q}{q_n} \right) \left(\frac{v_f}{v_n} - 1 \right)^2}{(v_f T_f)^2} \right)} \right] \right\}$$

V_f = vapaa nopeus (km/h)

T_f = otantajakson pituus

q_n = liikennemäärä kriittisellä tiheydellä

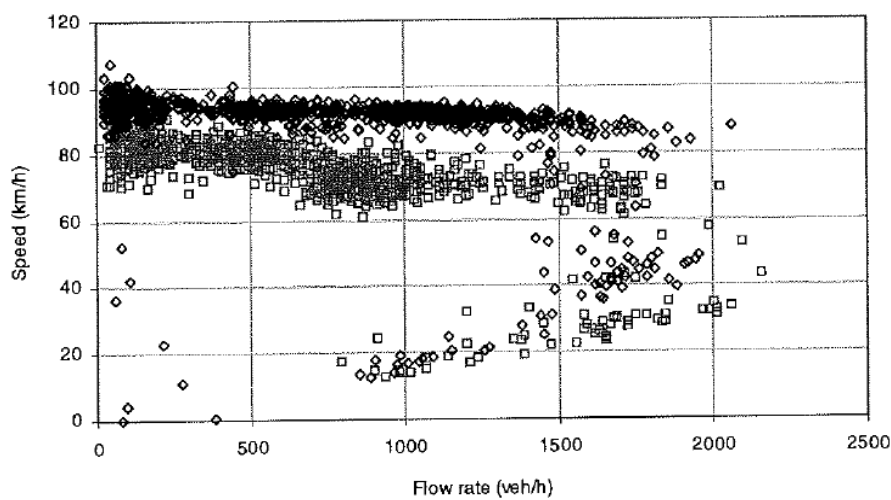
v = liikennevirran nopeus

v_n = kriittinen nopeus

$$z = \left(\frac{q}{q_n} \right) - 1$$

q = liikennemäärä

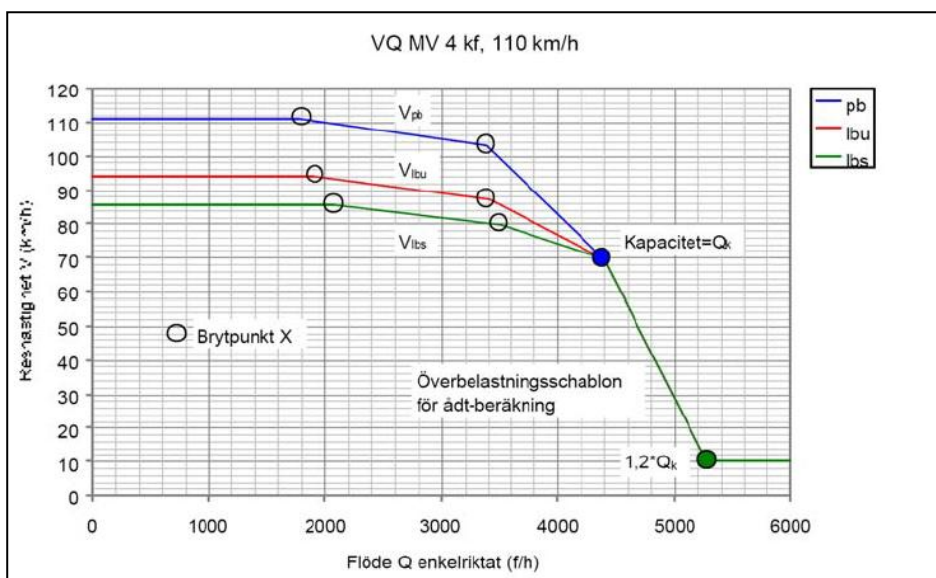
L_{hj} = ajoneuvojen keskimääräinen etäisyys toisistaan kriittisellä tiheydellä



Kuva 7 5 minuutin otantajaksojen havaintopisteet liikennemäärä-nopeuskuvaajassa Westgate -moottoritieellä (Akcelik 1999).

5.1 Ruotsalaiset käytännöt

Ruotsin palvelutason määrittämismenetelmät eivät perustu HCM-menetelmiin. Ruotsissa on käytössä EVA-malli, jolla voidaan arvioida ja laskea tieinvestoinnin vaikutuksia. EVA-malli hyödyntää liikennemäärä-nopeusdiagrammeja, joita on kehitetty Ruotsissa kenttämittaus- ja simulointitutkimuksissa. (Ojala ym. 2007.)



Kuva 8 Liikennemäärä-nopeusdiagrammi, moottoritie 110km/h (Ojala ym. 2007).

Liikennemäärän ja liikennevirran nopeuden riippuvuutta kuvaava käyrästä käsittää koko suunnan liikennemäärän eri ajoneuvoryhmät eroteltuna. Tällöin väylän välityskyky on eri ajoneuvoryhmien liikennemäärä-nopeuskäyrän leikkauskohdassa. Palvelutason sijaan Ruotsissa käytetään sujuvuustasomääritelmää, joka liittyy väylän käyttösuhteeseen. Sujuvuustaso luokittelee on Ruotsissa HCM:n ja HBS:n menetelmien palvelutasoluokittelua karkeampi. Sujuvuusasteikossa on ainoastaan kolme tasoa. (Ojala ym. 2007.)

Taulukko 5 Ruotsalainen väylän sujuvuusasteikko käyttösuhteen mukaan.

Taso autoliikenteelle	Käyttösuhde
A Hyvä	$B < 0,8$
B Vähemmän hyvä	$0,8 < B < 0,9$
C Matala	$0,9 < B < 1,0$

6 Tutkimusaineisto ja -menetelmä

6.1 Mittauspisteet

Aineistona tutkimuksessa käytettiin LAM-pisteiden (liikenteen automaattinen mittausjärjestelmä) liikennetietoa. Liikennevirastosta tilattiin aineistot vuosilta 2010–2012. Mittauspisteiden laskentajärjestelmä perustuu kahteen peräkkäiseen induktiosilmukkaan, jotka ovat upotettu päällysteen rakenteeseen. Järjestelmä laskee liikenteen tiedot erikseen jokaiselta kaistalta väylän molemmista ajosuunnista. Mittauspisteiden anturit havaitsevat ajoneuvokohtaisesti seuraavat tiedot:

- ohitusajankohta sadasosasekunnin tarkkuudella
- auton käyttämä ajokaista ja ajosuunta
- ajoneuvoryhmä
- auton pituus
- ajonopeus.

LAM-piste erottelee ajoneuvot 7 ajoneuvoryhmään:

- 1 = henkilö- ja pakettiautot
- 2 = kuorma-autot ilman perävaunua
- 3 = linja-autot
- 4 = kuorma-auton ja puoliperävaunun yhdistelmät
- 5 = kuorma-auton ja varsinaisen perävaunun yhdistelmät
- 6 = henkilö- tai pakettiauton ja kevytperävaunun yhdistelmät
- 7 = henkilö- tai pakettiautojen asuntovaunun yhdistelmät

Tutkimuksessa on tarkasteltu 42 mittauspisteen aineistoja. Nämä mittauspisteet on valittu tieosuuden liikennemääräluokan ja nopeusrajoituksen mukaan. Tutkimuksessa käytettiin ainoastaan niitä moottoritien linjaosuuksia, missä oli kaksi kaistaa ajoradalla. Aineistoa kerättiin ainoastaan tieosuuksilta, joiden keskimääräinen vuorokausiliikenne tieosuuden poikkileikkauksessa oli yli 12 000 ajoneuvoa vuorokaudessa. Koska tutkimuksessa selvitetään liikennemäärän vaikutusta tieosuuden liikenteen nopeuteen, tulee

liikennemäärä mittauspisteessä olla riittävä luotettavien tulosten saamiseksi. Valittujen mittauspisteiden tieosuuksien nopeusrajoitukset ovat 100 km/h sekä 120 km/h. Nopeusrajoitus 80 km/h on jätetty tutkimuksen ulkopuolelle. Taulukossa 6 on esitetty kunkin tutkimuksessa käytetyn laskentapisteen LAM-numero, pisteen nimi, kunta, jonka alueella piste sijaitsee sekä pisteen sijainnin tieosoite.

Taulukko 6 Tutkimusaineiston mittauspisteet.

LAM Nro.	Nimi	Kunta	Tieosoite	LAM Nro.	Nimi	Kunta	Tieosoite
104	Palojärvi	Vihti	1/009/01058	463	Pirkkala, Sankila	Pirkkala	3/137/01476
108	Karhunkorpi	Nurmijärvi	3/106/04555	572	Salminlahti	Kotka	7/031/01616
109	Jakomäki	Helsinki	4/103/02500	825	Hiltulanlahti	Kuopio	5/158/01170
110	Mäntsälä,	Mäntsälä	4/110/04543	828	Rahusenlampi	Kuopio	5/201/02150
112	Treksilä,	Porvoo	7/007/03888	832	Levänen	Kuopio	5/159/03490
142	Levanto	Mäntsälä	4/115/04391	933	Palokka	Jyväskylä	4/301/04620
179	Fazerila	Vantaa	7/001/02300	1201	Kaukovainio	Oulu	4/367/02297
191	Kolmiranta	Kirkkonummi	1/007/04030	1226	Kempele	Kempele	4/364/04245
192	Veikkola	Kirkkonummi	1/008/02638	1237	Oulun kasarmi	Oulu	4/401/01657
193	Hevoskallio	Lohja	1/010/02100	1238	Isko	Oulu	4/403/00844
227	Kirismäki	Kaarina	1/031/04794	1243	Luhasto	Liminka	4/363/03300
239	Kaarina	Kaarina	1/033/02485	1244	Laanila	Oulu	4/402/00862
249	Ihala	Raisio	8/102/05700	1250	Välkkylä	Oulu	4/401/00450
401	Sääksjärvi	Lempäälä	3/134/05138	1251	Oulu, Lintula	Oulu	4/367/04096
424	Hollola,	Hollola	4/119/03557	1601	Lakiamäki	Salo	1/021/04143
429	Herajoki	Riihimäki	3/110/06230	1602	Kruusila	Salo	1/020/06303
435	Karkuvuori	Tampere	9/204/02190	1603	Syvälampi	Salo	1/018/04586
437	Ojoinen 2	Hämeenlinna	3/117/00435	1604	Lahnajärvi	Salo	1/017/02205
449	Sarankulma	Tampere	3/136/01340	1605	Hauklampi	N.Pusula	1/015/03515
450	Myllypuro	Tampere	3/139/01406	1606	Pitkämäki	N.-Pusula	1/014/02233
462	Rajasalmen silta	Nokia	3/138/01660	1607	Karnainen	Lohja	1/012/02234

Mittauspisteistä 22 sijaitsi nopeusrajoituksen 100 km/h alueella ja 20 rajoituksen 120 km/h alueella. Mittauspisteet 1601–1607 sijaitsevat Turun moottoritillä, jolla on ollut mittausaikana käytössä vaihtuvat nopeusrajoitukset. Aineistosta on pyritty karsimaan sellainen data, jossa esiintyy alennettuja nopeusrajoituksia kelistä tai muista tieosuuksilla esiintyneistä häiriöistä johtuen.

6.2 Liikennetiedon käyttö

Mittauspiste tallentaa tiedot jokaisesta ohittavasta ajoneuvosta kaistakohtaisesti. Ajo-kaistat on numeroitu yhdestä neljään, missä yksi ja neljä tarkoittavat erisuuntien oikeanpuolisia kaistoja. Tulokset on esitetty kaistoittain ja ajosuunnittain liitteessä 1. Tutkimuksen havainnollisuuden yksinkertaistamiseksi ajoneuvoryhmät 2–7 on luokiteltu ras-kaiksi ajoneuvoiksi. Ajoneuvoryhmää 1 käsitellään tutkimuksessa henkilöautoina.

Aineistosta rajattiin pois tutkimuksen kannalta virheellinen tai epäluotettava aineisto. Poistetut tiedot olivat alle 20 km/h nopeutta kulkevat ajoneuvot ja virheellisen saapu-misajan saaneet ajoneuvot. Aineisto on tarkastettu Matlab-ohjelmistolla sekä manuaali-sesti mittausaineiston aika-nopeuskuvaajista. Alkuperäisessä datassa esiintyi virheellistä tietoa myös mitatun ajan suhteen. Virheellisiä tietoja sisältäneet vuorokaudet on poistet-tu aineistosta.

Häiriöitä on poistettu aineistosta Liikenneviraston toimittaman häiriötietojen perusteel-la. Häiriötiedotteet kattavat kaikki Liikennevirastolle ilmoitetut häiriöt. Rajatulla mitta-usasemantiedoilla on määritelty tieosuuden kaistakohtainen liikennemäärä, ajoneuvojen nopeudet, keskinopeus sekä raskaanliikenteen osuus.

6.3 Sää- ja kelitietoaineisto

Mittausaineistosta on käytetty ainoastaan niiden vuorokausien dataa, jolloin missään LAM-mittauspisteen läheisyydessä ei ollut mitattu sademääräksi yli 0,01 mm. Tämä tarkoittaa, että mittausajankohta on käytännössä ollut täysin sateeton. Sademäärätiedot kerättiin sääasemilta, jotka sijaitsivat lähimpänä tutkimuksessa käytettävää LAM-mittauspistettä. LAM-mittausaineistoa on käytetty tutkimuksessa ainoastaan niiltä vuo-rokausilta, jolloin tienpinta ei ole jäänyt minään vuorokauden aikana. Ilmastokeskuk-sen lämpötilatietojen perusteella tutkimuksessa on käytetty aineistoa kuukausilta touko-kuu-syyskuu vuosina 2010, 2011 ja 2012. Taulukossa 7 on esitelty tiesääasemien anta-ma kelitieto.

Taulukko 7 Tiesääasemien tuottama kelitieto.

<i>Ilman lämpötila</i>	<i>Kelitieto1</i>	<i>Pintasignaali3 (anturi3)</i>
<i>Ilman lämpötilan muutos</i>	<i>Kelitieto2</i>	<i>Jäätaajuus3 (anturi3)</i>
<i>Tienpinnan lämpötila (tieanturi1)</i>	<i>Varoitus1 (status1)</i>	<i>Ilman lämpötila (DST111)</i>
<i>Tienpinnan lämpötilan muutos (tieanturi1)</i>	<i>Varoitus2 (status2)</i>	<i>Tienpinnan lämpötila (DST111)</i>
<i>Tienpinnan lämpötila (tieanturi2)</i>	<i>Johtavuus1</i>	<i>Ilman suhteellinen kosteus (DST111)</i>
<i>Tienpinnan lämpötilan muutos (tieanturi2)</i>	<i>Johtavuus2</i>	<i>Tienpinnan tila (DSC111:n statuksesta)</i>
<i>Kastepiste</i>	<i>Pintasignaali1</i>	<i>Sateen intensiteetti</i>
<i>Tienpinnalla olevan veden jäätymislämpötila</i>	<i>Pintasignaali2</i>	<i>Sadesumma</i>
<i>Tuulen keskinopeus</i>	<i>Jäätaajuus1</i>	<i>Sateen olomuoto</i>
<i>Tuulen maksiminopeus</i>	<i>Jäätaajuus2</i>	<i>Näkyvyys (km)</i>
<i>Keskimääräinen tuulensuunta</i>	<i>Vallitseva sää</i>	<i>Varoitus (DCS111:n statuksesta)</i>
<i>Ilmanpaine</i>	<i>Tienpinnan lämpötila (anturi3)</i>	<i>Tienpinnan kitka (DSC111)</i>
<i>Ilmanpaineen muutos</i>	<i>Tienpinnan lämpötilan muutos (anturi 3)</i>	<i>Veden määrä tienpinnalla (DSC111)</i>
<i>Ilmankosteus asemalla</i>	<i>Maan lämpötila (anturi 3)</i>	<i>Tienpinnan kitka (DSC111 - lukuarvo)</i>
<i>Sade</i>	<i>Tienpinnalla olevan veden Jäätymislämpötila</i>	<i>Varoitus3 (status3)</i>
	<i>Kelitieto3 (status3)</i>	<i>Johtavuus3 (anturi3)</i>

Tutkimusaineistosta voidaan käyttää ainoastaan valoisaa aikaa vuorokaudesta. Koska mittausaika on rajoitettu toukokuusta syyskuuhun, voidaan valoisa-aika määrittää auringon nousu- ja laskuaikojen perusteella aikavälille kello 7.30 – 18.30 (taulukko 8).

Taulukko 8 Auringon nousuaika ja laskuaika vuonna 2010.

PVM:	Auringon nousu kello:	Auringon lasku kello:
<i>1.5.2010</i>	<i>5.18</i>	<i>21.48</i>
<i>30.9.2010</i>	<i>7.23</i>	<i>18.51</i>

6.4 Tietyö- ja häiriöaineisto

Tarkasteltavilla tieosuuksilla saattaa esiintyä tietyömaita ja muuta liikennevirtaan häiriötä aiheuttavaa toimintaa. Merkittävimpiä häiriöitä ovat onnettomuudet sekä työmaat, jotka sulkevat kaistan tai aiheuttavat tilapäisiä muutoksia nopeusrajoituksiin. Näiden lisäksi häiriöitä voivat aiheuttaa tien varrella suoritettut erilaiset toimenpiteet tai tielle kulkeutuneet esineet tai eläimet.

Liikenneviraston häiriötiedot tulevat tiesää- ja liikenteen mittausjärjestelmistä sekä yhteistyöverkostolta mm. poliisilta, urakoitsijoilta, aluehälytys-/häätäkeskuksilta, tiepalvelulta ja muilta tienpitäjiltä. Häiriöilmoituksia tekevät myös yksittäiset tienkäyttäjät. (Liikennevirasto 2012.)

Tutkimusajankohtana toukokuu–syyskuu vuosina 2010–2012 häiriöilmoituksia Liikennevirastolle on tullut tarkasteltavien moottoritieosuuksien alueelta noin 10 000 kappaletta. Tiedot on luokiteltu merkittävää haittaa aiheuttaviin sekä lievää haittaa aiheuttaviin häiriöihin. Tutkimusaineistosta on poistettu mittautiedot mittauspisteittäin liikenteelle merkittävää haittaa aiheuttaneiden häiriöiden vaikutusajoilta. Pitkäaikaista häiriötä aiheuttaneiden työmaiden takia aineistosta poistettiin mittauspisteet numero 102, 167, 137 ja 139.

6.5 Tutkittavat ominaisuudet ja määritelmät

Tutkimuksen tavoitteena oli löytää malli liikennemäärän ja liikennevirran keskinopeuden väliselle riippuvuudelle. Tutkimuksessa on lähtökohtaisesti oletettu riippuvuusmallin jäljittelevän luvussa 3 esitettyä yhdysvaltalaisen HCM-mallin muotoa. Mallin kalibroiminen suomalaisella liikenteellä edellyttää HCM:n mallin parametrien estimointia epälineaarisella regressioanalyysillä.

Tutkimusaineistoa käsiteltiin Matlab-ohjelmistolla. Hyväksytyjä aineistoja tarkasteltiin tunnin aikajaksoissa. Kunkin jakson havainnoista laskettiin keskeiset liikennevirtaa kuvaavat tunnusluvut: liikennemäärä (ajon/h), liikennetiheys, raskaan liikenteen osuus sekä liikenteen harmoninen keskinopeus. Vapaa nopeus arvioitiin aineistoista kullekin mittauspisteelle ja kaistalle harmonisten keskinopeuksien aritmeettisena keskiarvona liikennemäärän ollessa alle 500 ajoneuvoa tunnissa. Kaikki suureet laskettiin kaistakohtaisesti ja tallennettiin kunkin kaistan omaan matriisitietokantaan. Mittauspistekohtaiset matriisit yhdistettiin omaksi matriisitietokannaksi, jotka sisälsivät kunkin mittauspisteen kaikkien mittauspäivien tiedot.

Aineiston käsittelyssä annettiin ehdoksi, että tunnin aikajakson liikennetiheys ei saanut ylittää HCM:n kriittisen tiheyden arvoa 28 henkilöautoa/km/kaista ja ajoneuvojen nopeudet eivät saaneet alittaa 20 km/h. Aineistosta poistettiin myös tarkasteluvälit, joissa liikennemäärä oli alle 50 ajoneuvoa tunnissa. Nopeuteen tehdyt rajaukset vaikuttavat ainoastaan keskinopeuksiin. Vaikka ajoneuvon nopeus on poistettu keskinopeuden laskennasta, ajoneuvo on laskettu mukaan liikennemäärään.

Tutkimuksessa käytettiin mittausaineistolle kahta eri jaottelukriteeriä. Ensimmäisessä jaottelussa mittausaineisto jaettiin kaistoittain vapaan nopeuden luokkiin 95–105 km/h, 105–115 km/h ja 115–125 km/h. Kyseessä olevassa tarkastelussa vapaata nopeutta ei määritelty regressioanalyysillä. Vapaa nopeus laskettiin keskinopeuden aritmeettisena keskiarvona kun liikennemäärä oli alle 500 ajoneuvon tunnissa. Ensimmäisessä jaottelussa ei otettu huomioon väylän nopeusrajoituksia.

Toisessa tarkastelussa aineistojen määrittely tehtiin nopeusrajoituksen pohjalta. Aineistoa käsiteltiin kaistakohtaisesti. Tarkastelussa vapaa nopeus määriteltiin yhtenä regressioanalyysin estimoitavana kertoimena.

Tutkimuksessa kalibroitavana mallina käytettiin HCM 2010:n mukaista yhtälöä, joka voidaan esittää seuraavassa muodossa:

$$v = v_f - (q_s > q_0) * a * (q_s - q_0)^2 \quad (6.1)$$

Yhtälön parametrit ovat vapaa nopeus (v_f), yhtälön skaalauskerroin (a) ja yhtälön taitepiste (q_0). Yhtälö sisältää loogisen lauseen ($q_s > q_0$). Kun laskennallisen liikennemäärän arvo on suurempi kuin yhtälölle annettu taitepisteen arvo, looginen lause saa arvon 1. Muussa tapauksessa looginen lause saa arvon 0 ja liikennemäärällä ei ole vaikutusta liikenteen keskinopeuteen.

Laskennallinen liikennemäärä määritettiin raskaan liikenteen korjauskertoimen avulla. Tutkimuksessa on käytetty HCM:n tasaisen maaston raskaan liikenteen henkilöautoekvivalenttia 1,5. Kun henkilöautoekvivalentti on määritetty, laskennallinen liikennemäärä voidaan määrittää suoraan regressioanalyysin selittäväksi muuttujaksi. Laskennallisen liikennemäärä laskettiin kaavalla 6.2.

$$q_s = q * (1 + P_T * (E_T - 1))$$

Regressioanalyysissä määriteltävät parametrit ovat vapaan nopeuden mukaisessa jaotellussa kaavan 6.1 skaalauskerroin sekä kuvaajan taitepiste. Regressioanalyysissä, jossa aineisto on jaoteltu nopeusrajoituksen mukaan, vapaa nopeus selvitetään estimoitavana kertoimena edellä mainittujen parametrien lisäksi. Jokaiselle nopeusluokalle määritellään mallien parametrit erikseen.

6.6 Regressiokäyrän määrittäminen

Nopeuden ja liikennemäärän riippuvuusmallin kalibrointi suomalaisella liikenteellä tarjoaa ulkomaalaisia malleja paremmat estimaatit tärkeille liikennettä kuvaaville parametreille.

Regressioanalyysillä mallinnetaan muuttujien välisiä riippuvuuksia. Muuttujat jaetaan kahteen ryhmään, jotka ovat selitettävät muuttujat sekä selittävät muuttujat. Tässä työssä mallinnetaan laskennallisen liikennemäärän sekä liikennevirran keskinopeuden välistä riippuvuutta kuvaavaa tilastollista mallia. Selitettävä muuttuja on liikennevirran keskinopeus ja selittävä muuttuja on laskennallinen liikennemäärä.

HCM-menetelmän mukaan moottoritien linjaosuudella liikennemäärä-nopeusriippuvuus pysyy vakiona kunnes laskennallinen liikennemäärä ylittää sille annetun raja-arvon. Tämän jälkeen liikennemäärä-keskinopeuskuvaaja lähtee kaartumaan alaspäin, kun liikennemäärän kasvu alkaa vaikuttaa liikenteen nopeuteen. Tutkimuksessa käytettävä perusolettaamus on, että liikennemäärän ja keskinopeuden riippuvuus käyttäytyy samalla tavoin kuin HCM:ssä on kuvattu. Tutkimusaineistoa täytyy tarkastella epälineaarisen regression kautta, koska HCM:n mallin muoto on toisen asteen yhtälö.

Regressioanalyysi suoritettiin Matlab R2012 -ohjelmistolla. Matlab on numeerisen lineaarialgebran sovelluksiin kehitetty ohjelmisto. Ohjelmiston toiminta perustuu suurilta osien matriisilaskentaan. (Haataja 2000.)

Ohjelmistossa on käytettävissä sovellus Curve fitting. Tässä tutkimuksessa regressioanalyysiin valittiin funktio nLINFIT nonlinear least-squares regression, joka on epälineaarinen regressioanalyysi pienimmän neliösumman menetelmällä. (MatLab 2012.)

Sovellus pyytää selitettävän muuttujan ja selittävien muuttujien arvomatriisit. Tässä tapauksessa käytetään aiemmin ohjelmistolla laskettuja laskennallisen liikennemäärän ja harmonisen keskinopeuden matriiseja. Sovellukseen syötetään regressioanalyysille määritelty malli, joka sisältää estimoitavat kertoimet. Estimoitaville kertoimille annetaan alkuarvot, josta pienimmän neliösumman iterointi voidaan aloittaa.

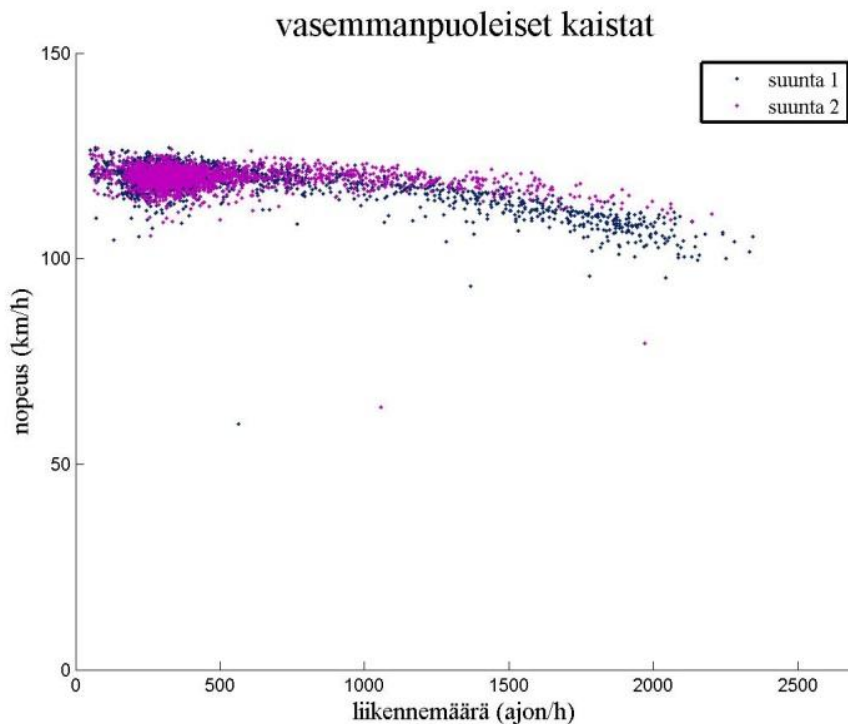
Funktio palauttaa regressiossa lasketut kertoimien arvot, joilla muodostetaan lopullinen malli liikennemäärän ja liikennevirran keskinopeuden väliselle riippuvuudelle. Estimointikertoimien alkuarvot perustuvat HCM:ssä esitettyihin arvoihin.

Regressioanalyysissä estimoitujen parametrien arvojen perusteella piirretään graafinen kuvaaja mallista, jota tarkastellaan mittausaineistosta tuotetun pisteparvikuvaajan kanssa. Graafisesta esityksestä voidaan helposti havaita suurimmat poikkeamat mittausaineiston ja mallin välillä. Graafisia sovituksia on esitetty liitteessä 2. Matlab-ohjelmisto laskee myös luotettavuutta kuvaavat arvot regressioanalyysistä, joiden perusteella pystytään arvioimaan mallin yhteensopivuutta mittausaineiston havaintoihin.

7 Tutkimustulokset

7.1 Liikennevirran käyttäytyminen

Jokaiselle mittauspisteelle tuotettiin kuvaajat todellisen liikennemäärän ja keskinopeuden sekä liikennetiheyden ja liikennemäärän riippuvuudesta. Kuvaajat esitetään liitteessä 1. Kuvaajissa moottoritien linjaosuuden oikean ja vasemman kaistan liikennevirta on eroteltuna eri pisteparviin. Myös mittauspisteen eri ajosuunnat on eroteltuna eri väreillä havainnollisuuden vuoksi. Liitteen havainnekuvat esittävät sekaliikennevirtaa, joten liikennevirrassa on mukana raskasta liikennettä. Liitteen kuvaajista on poistettu häiriöllinen data. Kuvassa 9 on esitetty esimerkki pisteparvikuvaajasta, joka kuvaa moottoritien linjaosuuden vasemmanpuoleisen kaistan liikennevirtaa.



Kuva 9 Moottoritien linjaosuuden liikennemäärä-keskinopeuspisteparvikuvaaja (LAM Nro. 192, Veikkola, Kirkkonummi. Nopeusrajoitus 120 km/h).

Liitteen 1 kuvaajista havaitaan, että eri mittauspisteiden välillä on huomattavia eroja. Mittauspisteiden pisteparvien hajonta on 120 km/h nopeusrajoituksen alueella merkittävästi suurempaa kuin 100 km/h alueella.

Osassa mittauspisteitä on huomattavia eroja eri ajosuuntien käyttäytymisen välillä. Erot voivat johtua hetkellisistä ajonopeuksien alenemiseen johtaneista tapahtumista tarkasteltavalla tieosuudella. Suurinta hajontaa pisteparvissa esiintyy valtatiellä 1 Salon kohdalla, missä nopeusrajoitus on 120 km/h. Valtatie 1:llä on ollut käytössä muuttuvat nopeusrajoitukset mittausaikana. Mikäli hetkellisistä nopeusrajoitusten muutoksista ei ole ilmoitettu Liikenneviraston häiriöpalveluun, muutokset saattavat näkyä aineistossa.

HCM:n moottoritien linjaosuuden liikennemäärä-nopeusriippuvuusmalliin verraten samankaltaisia tuloksia on saatu 120 km nopeusrajoitusalueella Hakarin ja Levannon mittauspisteissä Mäntsälässä (LAM 110, 142), Kolmirannan ja Veikkolan mittauspisteissä Kirkkonummella (LAM 191, 192) sekä Miekkion mittauspisteessä Hollolassa (LAM 424). 100 km/h nopeusrajoitusalueella HCM:n mallin kanssa yhteneviä tuloksia on saatu mittauspisteissä Lempäälässä (LAM 401), Pirkkalassa (LAM 463), Kuopiossa (LAM 828) sekä Oulussa (LAM 1237).

Suurella osalla mittauspisteistä liikennemäärähavainnot eivät ole riittäviä kuvaamaan liikenteen käyttäytymistä koko vakaan liikennevirran alueella. Tämä tarkoittaa, että liikennevirta käytännössä kulki vapaata nopeutta eikä liikennemäärä vaikuttanut liikennevirran keskinopeuteen. Vasemmanpuoleisen kaistan tuntiliikennemäärät olivat pääosin suurempia kuin oikeanpuoleisen kaistan tuntiliikennemäärät. Liikennevirrassa saattaa esiintyä valikoitumista kaistoilla eri kuljettajatyyppeihin suhteen. Hitaat kuljettajat ja raskasliikenne käyttävät pääosin moottoritiellä oikeanpuoleista kaistaa. Tämä johtaa siihen, että vapaa nopeus on merkittävästi alhaisempi kuin nopeusrajoitus, varsinkin 120 km/h nopeusrajoitusalueen moottoriteiden linjaosuuksilla.

7.2 Liikennemäärä-nopeuskuvaajat vapaan nopeuden mukaan

Mittauspisteiden kaistakohtaiset aineistot jaettiin regressioanalyysia varten kolmeen luokkaan lasketun vapaan nopeuden suhteen riippumatta tieosuudella vallitsevasta nopeusrajoituksesta. Tässä tarkastelussa vapaa nopeus on laskettu ennen regressioanalyysi-

sin suorittamista. Vapaiden nopeuksien laskettu keskiarvo sekä kaistamäärä on esitetty taulukossa 9. Taulukossa esitetty kaistamäärä kertoo, kuinka monen kaistan mittausaineistoa on käytetty kunkin luokan tarkasteluissa. Oikean kaistan vapaanopeusluokassa 115–125 km/h ei ole havaintoja. Kaikki mittausaineiston kaistat eivät mahtuneet nopeusluokkien raja-arvojen sisään. Osassa kaistoja vapaat nopeudet olivat alle 95 km/h tai yli 125 km/h.

Taulukko 9 Vapaan nopeuden mukainen aineistojaottelu.

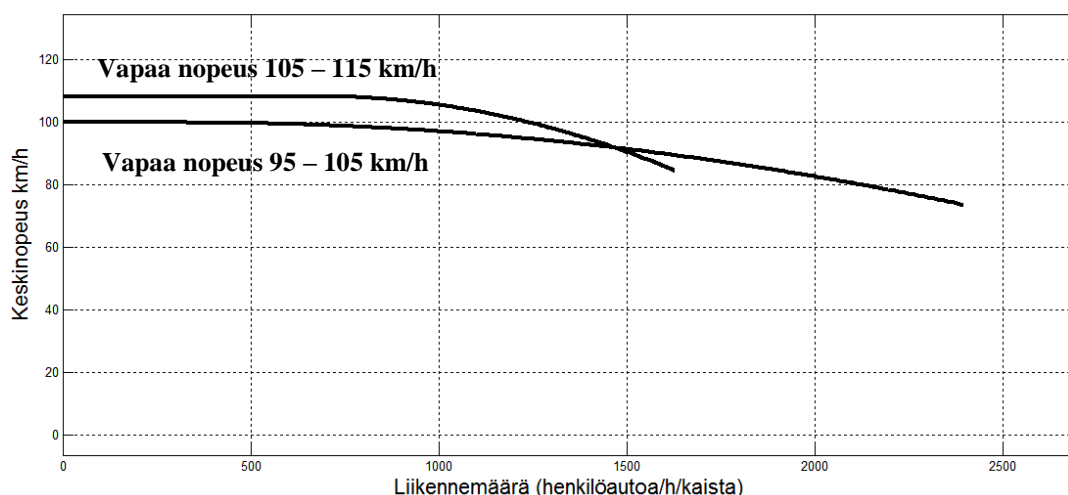
Nopeusluokat	Oikeat kaistat		Vasemmat kaistat	
	Vapaa nopeus	Kaistamäärä	Vapaa nopeus	Kaistamäärä
95–105	99,85	47	102,63	9
105–115	108,27	28	108,69	35
115–125		0	120,73	37

Nopeusluokka 95–105 koostuu pääosin 100 km/h nopeusrajoitusalueen mittauspisteiden havainnoista. Nopeusluokka 105–115 koostuu oikealla kaistalla suurimmaksi osaksi 120 km/h nopeusrajoituksen mittauspisteistä. Vasemmanpuoleisella kaistalla 95–105 nopeusluokan havainnot edustavat pääosin 100 km/h nopeusrajoitusalueen liikennettä. 115–125 koostuu pääosin vasemman kaistan 120 km/h rajoitusluokan liikenteestä. Regressioanalyysissä estimoitiin oikeanpuoleiselle kaistalle taulukossa 10 esitetyt parametrit.

Taulukko 10 Oikean kaistan parametrit.

Nopeusluokka	vapaa nopeus (km/h)	taitepiste	skaalauskerroin
95–105	99,85	325	0.000006127
105–115	108,27	677	0.000026100
115–125	-	-	-

Vapaan nopeusluokan 95–105 aineistolle tehdyn regressioanalyysin perusteella taitepisteeksi muodostui liikennemäärä 325 henkilöautoa/h ja skaalauskerroimeksi 0.000006127. Vapaa nopeusluokan 105–115 taitepiste asettui liikennemäärään 677 henkilöautoa/h. ja skaalauskerroimeksi saatiin arvo 0.000026100. Suuremmassa nopeusluokassa 105–115 ei esiinny suurempaa laskennallista liikennemäärää kuin 1600 henkilöautoa/h. Luokassa 105–115 liikennemäärän kasvun vaikutus liikennevirran nopeuteen on erityisen suuri verrattuna alemman vapaan nopeuden luokkaan 95–105.



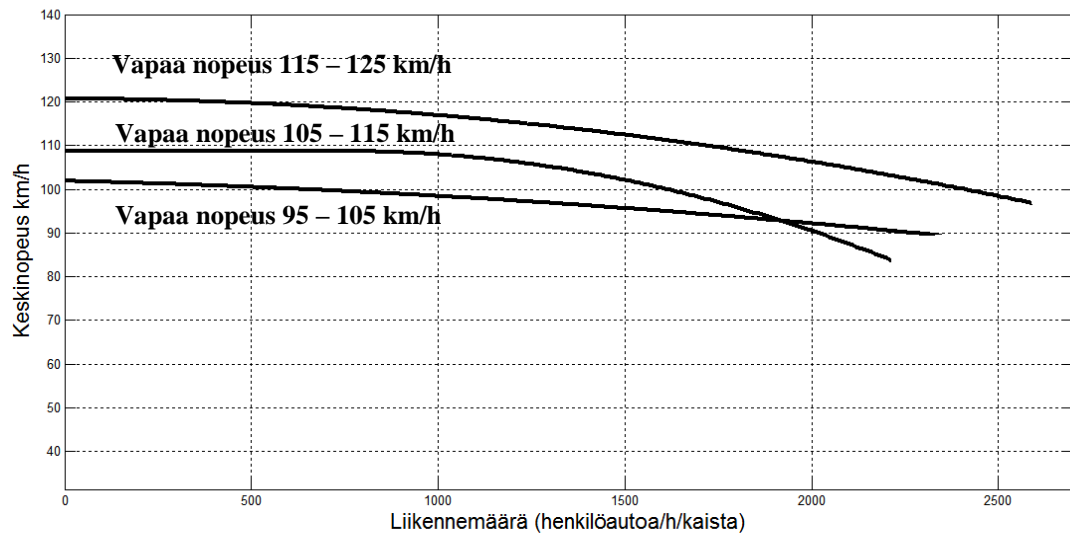
Kuva 10 Oikeanpuoleisen kaistan laskennallisen liikennemäärän ja keskinopeuden riippuvuuden kuvaajat vapaan nopeuden mukaan.

Moottoriteiden linjaosuuksien vasemmalla kaistalla esiintyi havaintoja kaikissa vapaan nopeuden luokissa. Nopeusluokissa 95–105 ja 115–125 iteroinnissa ei löytynyt taitepisteelle arvoa, vaan se jäi alarajaksi asetettuun arvoon 0. Luokassa 105–115 taitepisteelle muodostui arvoksi 618,9. Aritmeettisena keskiarvona määritelty vapaa nopeus, iteroitu taitepiste sekä skaalauskerroin on esitetty nopeusluokittain taulukossa 11.

Taulukko 11 Vasemman kaistan parametrit.

Nopeusluokka	vapaa nopeus (km/h)	taitepiste	skaalauskerroin
95–105	102,63	0	0.000001400
105–115	108,69	618.9	0.000008907
115–125	120,73	0	0.000003407

Vasemmanpuoleisilla kaistoilla on havaittavissa samanlainen voimakas nopeuden alenema nopeusluokassa 105–115, mikä esiintyi myös oikeanpuoleisilla kaistoilla. Suurimman nopeusluokan 115–125 liikennevirran nopeuden riippuvuus liikennemäärän kasvusta on muita luokkia pienempi. Tässä kyseessä olevassa nopeusluokassa esiintyy selkeästi suurempia liikennemääriä kuin muissa nopeusluokissa.



Kuva 11 Vasemman kaistan laskennallisen liikennemäärän ja keskinopeuden riippuvuuden kuvaajat vapaan nopeuden mukaan.

Vasemmalla kaistalla nopeusluokassa 95–105 mallin kuvaajan skaalauskerroin on pienin. Liikennemäärän vaikutus liikennevirran keskinopeuteen näyttää käyttäytyvän lähes lineaarisesti. Taulukossa 12 on esitetty HCM:n malli, johon on sijoitettu tutkimuksessa estimoidut parametrit.

Taulukko 12 Laskennallisen liikennemäärän ja nopeuden välisen riippuvuuden mallit vapaan nopeuden mukaan.

Nopeusluokat	Moottoritien linjaosuuden mallit (oikeanpuoleinen kaista)
95–105	$V = 99,85 - ((q_s > 325) * 0.000006127 * (q_s - 325)^2)$
105–115	$V = 108,27 - ((q_s > 677) * 0.0000261 * (q_s - 677)^2)$
Nopeusluokat	Moottoritien linjaosuuden mallit (vasemmanpuoleinen kaista)
95–105	$V = 102,63 - ((q_s > 0) * 0.0000014 * (q_s - 0)^2)$
105–115	$V = 108,69 - ((q_s > 619) * 0.000008907 * (q_s - 619)^2)$
115–125	$V = 120,73 - ((q_s > 0) * 0.000003407 * (q_s - 0)^2)$

7.3 Liikennemäärä-nopeuskuvaajat tieosuuden nopeusrajoituksen mukaan

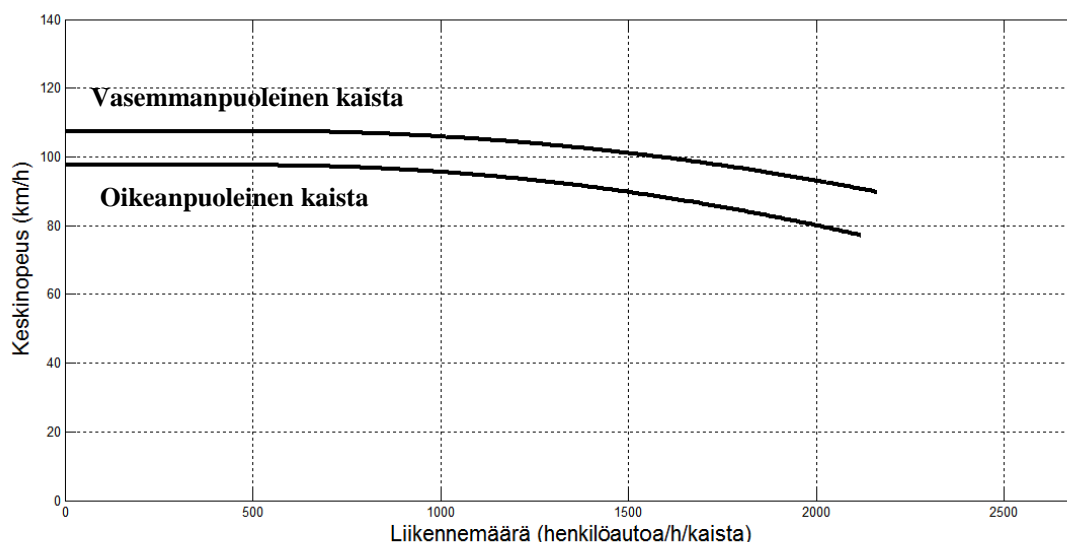
Tarkastelussa mittausaineisto on jaettu tieosuuden nopeusrajoituksen mukaan. Tarkastelussa kuvaajien taitepisteen minimiarvoksi on asetettu 500 ajon/h henkilöautomäärän alaraja. Minimiarvo on annettu kuvaajan muodon selkiyttämiseksi. Alustavassa regres-

sioanalyysissä taitepisteen arvo jäi useassa tapauksessa negatiiviseksi ilman miniarvoa. Taitepisteen minimiarvoksi on valittu 500 henkilöautoa/h, koska ensimmäisessä tarkastelussa vapaan nopeuden laskennassa käytettiin aineistoa, jolle asetettiin ylärajaksi myös 500 henkilöautoa/h. Vapaa nopeus on estimoitu regressioanalyysin yhteydessä. Regressioanalyysi tehtiin erikseen 100 ja 120 km/h nopeusrajoitusalueilla sijainneille mittauspisteille.

Taulukko 13 Nopeusrajoitusalueen 100 km/h regressioanalyysissä estimoidut parametrit.

Kaista	vapaa nopeus (km/h)	taitepiste	skaalauskerroin
Oikea	97.51	500	0,000007751
Vasen	107.50	500	0.000006410

Taulukossa 13 on esitetty nopeusrajoitusalueen 100 km/h oikean ja vasemman kaistan parametrit erikseen. Regressioanalyysissä ei löytynyt taitepisteelle suurempia arvoja kuin minimiksi asetettu 500, joten taitepiste asettui kyseiseen pisteeseen. Vasemmanpuoleisen kaistan vapaa nopeus on regressioanalyysin perusteella 10 km/h korkeampi kuin oikeanpuoleisen kaistan vapaa nopeus. Kuvaajien muodot vastaavat toisiaan. Suurimmat havaitut henkilöautoliikennemäärät olivat molemmissa noin 2150 henkilöautoa/h.



Kuva 12 Laskennallisen liikennemäärän ja keskinopeuden kuvaajat 100 km/h nopeusrajoitusalueella.

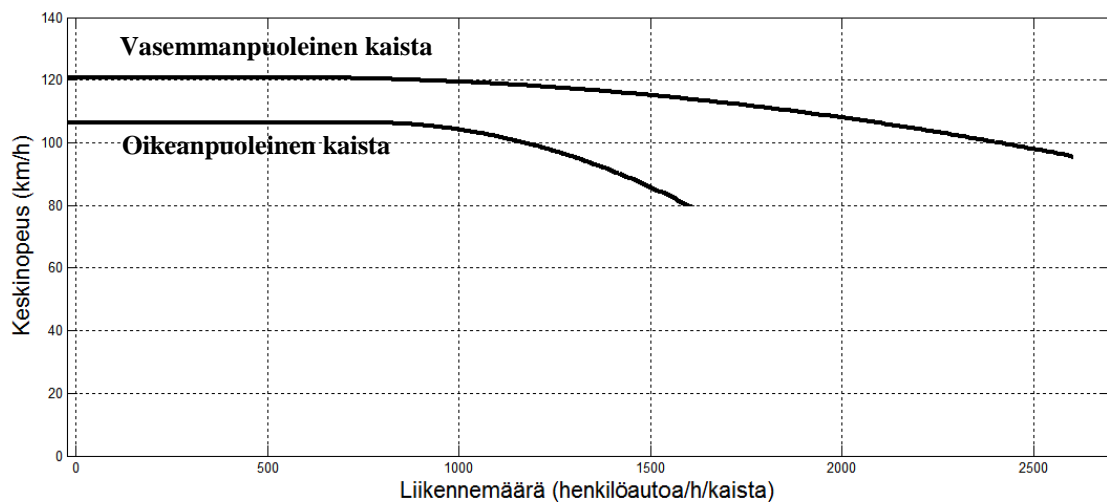
120 km/h nopeusrajoituksen tieosuuksille suoritettiin regressioanalyysi ensimmäistä tarkastelua vastaavilla ehdoilla. Iteroinnissa taitepisteen arvoksi saatiin oikeanpuoleisel-

le kaistalle 751.8 henkilöautoa/h ja vasemman kaistan taitepisteen arvo jäi 500 henkilöautoon tunnissa, mikä vastasi sen miniarvoa. Oikean kaistan vapaan nopeuden arvo jäi huomattavasti nopeusrajoitusta alhaisemmaksi. Vasemmalla kaistalla vapaa nopeus vastasi nopeusrajoituksen suuruutta.

Taulukko 14 120 km/h nopeusrajoituksen tieosuuksien estimoidut parametrit.

Kaista	vapaa nopeus (km/h)	taitepiste	skaalauskerroin
Oikea	106.2	751.8	0,00003996
Vasen	120.9	500.0	0.00000571

Oikean kaistan liikennemäärän maksimiarvo jää ainoastaan 1600 ajoneuvoon. Oikean kaistan kuvaajan skaalauskerroin on erittäin suuri suhteessa muihin malleihin. Kaistan kapasiteetti on poikkeuksellisen alhainen. Kuvaajan käyttäytyminen poikkeaa merkittävästi ulkomaalaisista tutkimuksista saaduista tuloksista. 120 km/h rajoitusalueen vasemman ja oikean kaistan liikennevirran ja keskinopeuden välinen riippuvuus poikkeaa suuresti myös 100 km/h rajoitusalueen liikennevirran käyttäytymisestä, jossa oikean ja vasemman kaistan yhtälöt saavat lähes yhtäläiset skaalaukertoimet.



Kuva 13 Laskennallisen liikennemäärän ja keskinopeuden kuvaajat 120 km/h nopeusrajoitusalueella.

Taulukossa 15 on esitetty HCM:ään pohjautuva malli mittausaineistolla kalibroiduilla parametreilla.

Taulukko 15 Laskennallisen liikennemäärän ja nopeuden välisen riippuvuuden mallit kaistan ja nopeusrajoituksen mukaan.

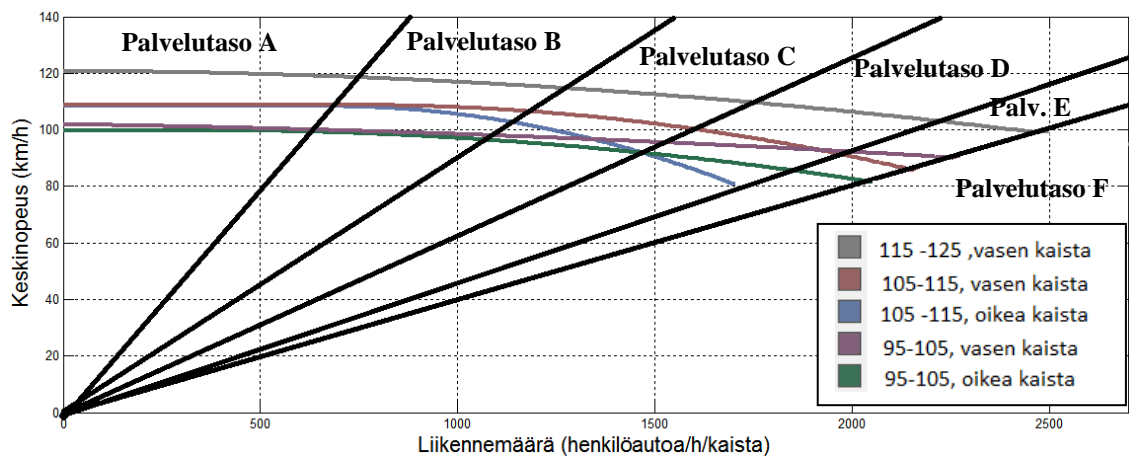
	Liikennemäärä-keskinopeusmallit
Raj. 100, oikea kaista	$V = 97.51 - (q_s > 500) * 0.000007751 * (q_s - 500)^2$
Raj. 100, vasen kaista	$V = 107.5 - (q_s > 500) * 0.00000641 * (q_s - 500)^2$
Raj. 120, oikea kaista	$V = 106.2 - (q_s > 751.8) * 0.00003996 * (q_s - 751.8)^2$
Raj. 120, vasen kaista	$V = 120.9 - (q_s > 500) * 0.00000571 * (q_s - 500)^2$

7.4 Mallien sovellettavuus

HCM:n moottoritien linjaosuuden mallin muotoa pystytään hyödyntämään myös suomalaisen liikennevirran mallintamisessa. Malli koostuu lineaarisesta osuudesta, kun liikennemäärän kasvu ei vielä vaikuta liikennevirran keskinopeuteen sekä epälineaarisesti laskevasta osuudesta, kun liikennemäärän vaikutus keskinopeuteen on eksponentiaalinen.

Mittausaineistosta ei pystytty laskemaan selkeää arvoa mallin lineaarisen osuuden pituudelle. Tutkimuksen perusteella lineaarinen osuus ei ole yhtä pitkä kuin HCM:ssä on esitetty. HCM:n kuvaajat ja parametrit on esitetty kappaleessa 3. Koska lineaarinen osuus ei saanut HCM:n mallia vastaavia arvoja, epälineaarinen osuus jäi pääosin HCM:n mallia loivemmaksi.

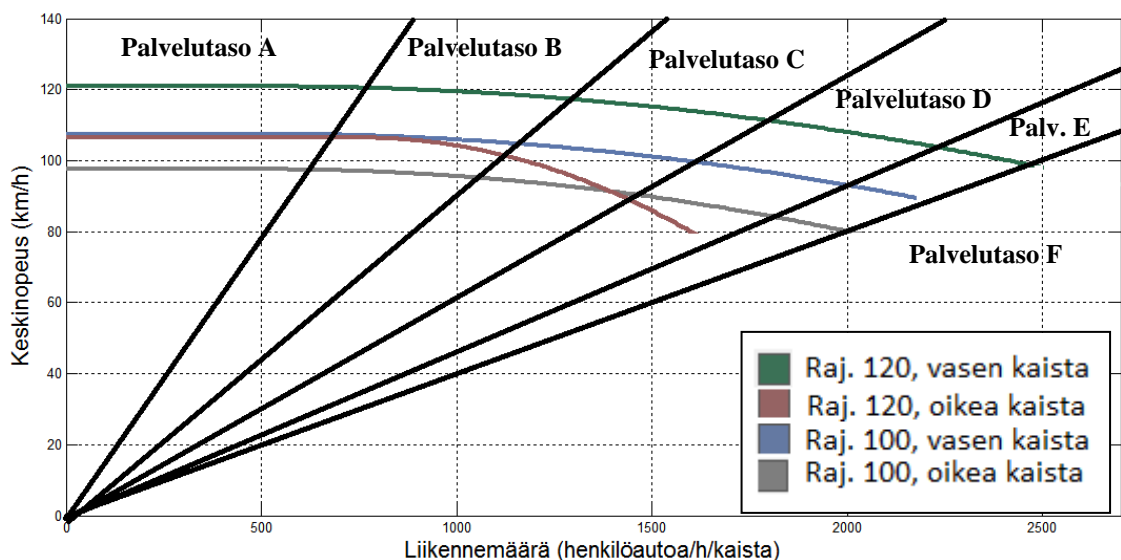
Vapaan nopeuden perusteella jaoteltu aineisto tuotti mallit, jotka eivät ole johdonmukaisia ulkomaalaisten mallien kanssa. Ensimmäisen tarkastelun tuloksia on esitetty kuvassa 14. Kuvassa on esitetty myös graafisesti HCM:n käyttämä palvelutasoluokitus moottoritien linjaosuuksille. Kuvaajat pääosin päättyvät palvelutasoluokkaan F, jonka liikenteiden tiheyden raja-arvo vastaa kriittistä tiheyttä 28 henkilöautoa kilometrillä kaistaa kohden.



Kuva 14 Vapaan nopeuden mukaisen määrittelyn liikennevirran kuvaajat sekä HCM:n palvelutasoluokat.

Vapaan nopeuden mukaan jaotellusta aineistosta on hankala määrittää, missä osassa aineistoa mahdollisia vääristymiä malleihin syntyy. Aineistoista ja malleista ei selviä liittyvätkö mallien erot nopeusrajoitusalueisiin. Tämän takia suoritettiin regressioanalyysi nopeusrajoituksen mukaan jaotellulle aineistolle. Kuvassa 15 on esitetty mallit kaistan ja nopeusrajoituksen mukaan.

Nopeusrajoituksen mukaiset mallit ovat selkeämmän muotoisia, kun ei oteta huomioon 120 km/h nopeusrajoitusalueen oikeata kaistaa. Tämän vuoksi suomalaista liikennevirtaa on hyödyllisempää tarkastella kaista- ja nopeusrajoituskohtaisesti.



Kuva 15 Nopeusrajoituksen mukaan määritellyn aineiston liikennevirran kuvaajat sekä HCM:n palvelutasoluokat.

Tässä tutkimuksessa lasketut moottoritien linjaosuuden parametrit ja niiden perusteella muodostetut mallit eivät ole sinällään käyttökelpoisia malleja. Karkeasti ne vastaavat kuitenkin pääosin HCM:ssä esitettyjä malleja. Kuvasta 15 on havaittavissa, että liikennemäärän vaikutus liikennevirran keskinopeuteen on heikompi kuin HCM:ssä on esitetty. Tässä tutkimuksessa esitettyjen mallien skaalauskerroimet ovat pääosin merkittävästi pienempiä kuin HCM:ssä on esitetty.

Jälkimmäiselle tarkastelulle laskettiin myös R^2 -luku regressioanalyysin luotettavuuden arvioimiseksi. R^2 -luvulla voidaan tarkastella regressiomallin selitysosuutta. Se kertoo, kuinka suuren osuuden selitettävän muuttujan vaihtelusta regressioanalyysin selittävät muuttujat pystyvät selittämään. R^2 -luku vaihtelee nollan ja yhden välillä. Luku lasketaan selitettävän muuttujan arvojen ja mallin tuottamien ennustearvojen korrelaation neliönä. Jos luku on lähellä arvoa 1, muuttujat pystyvät selittämään vaihtelut hyvin. Jos luku on lähellä arvoa 0, selitettävyys on heikko.

Taulukko 16 Mallien selityttävyyys

Mallit	R^2 -luku
Raj. 100, oikea kaista	0.347
Raj. 100, vasen kaista	0.5381
Raj. 120, oikea kaista	0.06725
Raj. 120, vasen kaista	0.446

Taulukossa 16 on esitetty nopeusrajoituksen ja kaistan mukaan jaotellun mittausaineiston regressioanalyysin R^2 -luvut. Taulukosta voidaan havaita, että malli kuvaa parhaiten liikennevirran ominaisuuksia molempien nopeusrajoitusten vasemmilla kaistoilla. 120 km/h nopeusrajoituksen tieosuudella oikeanpuoleisen kaistan R^2 -luku on erittäin pieni. Luku on niin pieni, että malli ei käytännössä selitä mittausaineistojen havaintoja ollenkaan. Tämä selittää osin 120 km/h nopeusrajoituksen tieosuuden oikeanpuoleisen kaistan mallin poikkeavuudet muihin malleihin verrattuna.

8 Johtopäätökset

8.1 Yhteenveto

Työssä tutkittiin moottoriteiden linjaosuuksien liikennevirran ominaisuuksia nopeus-liikennemääräriippuvuuden näkökulmasta. Uuden HCM 2010 -julkaisun mallien parametreja kalibroitiin suomalaisen liikennevirran avulla. Työssä on tarkasteltu HCM:n moottoriteiden linjaosuuksien liikennemäärä-nopeusmallien vapaan nopeuden, skaalauskerroimen ja kuvaajan taitepisteen arvoja perusolosuhteissa.

Työssä käytettiin LAM-mittausaineistoa 42 mittauspisteestä. Mittausaineistosta pyrittiin rajaamaan pois mittaustiedot, jotka sisälsivät normaalin liikennevirran sujuvuuteen vaikuttavia häiriöitä. Koska tutkimuksessa tarkastellaan vakaata liikennevirtaa, tarkasteluaineiston liikennevirralle asetettiin rajaehdoksi HCM:ssä esitetty laskennallisen liikennetiheyden kriittinen arvo 28 henkilöautoa/km/kaista.

Tutkimuksessa tehtiin mittausaineistolle kaksi erilaista tarkastelua. Ensimmäisessä tarkastelussa tutkimusaineisto jaettiin kolmeen nopeusluokkaan: 95–105 km/h, 105–115 km/h ja 115–125 km/h. Ensimmäisessä tarkastelussa vapaa nopeus määriteltiin mittausaineistosta mittauspiste- ja kaistakohtaisesti. Regressioanalyysissä selvitettiin parametrit taitepisteelle ja kuvaajan skaalauskerroimelle. Toisessa tarkastelussa aineisto jaettiin nopeusrajoitusalueen mukaan. Tässä tarkastelussa estimoitiin vapaa nopeus ja skaalauskerroin. Nopeusrajoituksen määrittelemän aineiston analyysissä taitepisteen minimiarvoksi määriteltiin 500 henkilöautoa/h. Regressioanalyysissä määriteltiin liikennemäärä-keskinopeusmallit vapaan nopeuden, taitepisteen sekä nopeusrajoituksen mukaan.

Henkilöautoekvivalenttina käytettiin HCM:n määrittämää lukuarvoa 1,5. Tämä mahdollisti muiden parametrien luotettavamman estimoinnin, koska henkilöautoekvivalentin estimointi tulisi suorittaa erillisenä tarkasteluna. Lukuarvo 1,5 ottaa huomioon raskaan liikenteen vaikutuksen tasaisessa maastossa. Koska Suomen moottoritiet sijaitsevat pääosin suhteellisen tasaisessa maastossa, voidaan HCM:n henkilöautoekvivalenttia pitää riittävällä tarkkuudella sopivana tähän tutkimukseen.

8.2 Päätelmät

Epävarmuutta tulosten uskottavuudelle asettaa eri mittauspisteiden ja -päivien mittausaineistossa esiintyvät suuret eroavaisuudet sekä liikennevirrassa esiintyvä häiriöiden määrä. Osa aineistossa esiintyvistä nopeuden vaihteluista voi johtua mittausaseman tuottamasta virheellisestä datasta.

Tutkimusaineiston luotettavuutta pyrittiin lisäämään tekemällä aineistoon rajauksia suurella varmuusmarginaalilla sään ja mittausajankohdan suhteen. LAM-mittauspisteet tuottavat kuitenkin tällä hetkellä luotettavinta mittautietoa Suomen moottoriteiltä.

Regressioanalyysi suoritettiin pienimmän neliösumman -menetelmällä. Menetelmä on yleisesti käytetty, mutta menetelmän tarkkuutta ja soveltuvuutta voidaan parantaa erilaisilla painotusmenetelmillä.

Tutkimustulosten mukaan Suomessa moottoriteiden linjaosuuksilla liikennemäärä alkaa vaikuttaa nopeuteen aikaisemmassa vaiheessa kuin HCM:n kuvaajissa on esitetty. Liikennemäärän vaikutus keskinopeuteen näyttää olevan nopeusrajoituksen ollessa 120 km/h HCM:n menetelmiä pienempi, kun taas 100 km/h nopeusrajoitusalueella sen vaikutus on suurempi. 120 km/h nopeusrajoitusalueen oikean kaistan havainnot poikkeavat suuresti ulkomaalaisista tutkimustuloksista sekä tutkimuksen muiden kaistojen liikennevirran käyttäytymisestä. Mittauspisteiden tiedot osoittavat kyseessä olevan kaistan liikenteen käyttäytyvän suhteellisen johdonmukaisesti. Tällaiseen liikennevirran käyttäytymiseen voi olla selityksenä suomalainen tapa suosia vasemmanpuoleista kaistaa, jolloin selkeästi hitaampi liikenne jää oikeanpuoleiselle kaistalle.

HCM:n tarkastelee kaistojen liikenteen ominaisuuksia keskimääräisesti olettaen, että kaikki kaistat toimivat samalla tavalla. Tutkimustulosten perusteella tämä näyttää toteutuvan 100 km/h nopeusrajoitusalueella, mutta ei 120 km/h alueella. Tutkimuksen perusteella voidaan siis kyseenalaistaa HCM:n määrittelymenetelmä, jossa molemmat kaistat arvioidaan samalla kaavalla ja lukuarvoilla. HCM ei ota huomioon myöskään väylien nopeusrajoituksia. Tässä tutkimuksessa tulokset viittaavat siihen, että liikennevirralla on erilaiset ominaisuudet riippuen nopeusrajoituksesta.

8.3 Suositukset

Suurempi luotettavuus mittausaineistolle voidaan saavuttaa sijoittamalla mittauspaikat tarkasti tutkimusta parhaiten palvelemaan ympäristöön ennen mittauksen aloittamista ja suorittamalla mittaukset mahdollisimman valvotuissa olosuhteissa. Tällöin liikenteessä esiintyvät häiriöt on helpompi jäljittää ja poistaa tutkittavasta aineistosta. Ennen tulevia liikennevirtatutkimuksia olisi syytä tarkastella myös mittauslaitteiden luotettavuutta ja kartoittaa luotettavampia menetelmiä mittausaineiston keräämiseen.

Tässä tutkimuksessa ei ole otettu huomioon kaikkien HCM 2010 -julkaisussa esitettyjen olosuhdemuuttujien vaikutuksia laskennalliseen liikennemäärään. Myöskään raskaan liikenteen henkilöautoekvivalenttia ja huipputuntikerrointa ei määritetty erikseen tässä tutkimuksessa. Nämä kertoimet olisi suositeltavaa tarkistaa jatkotutkimuksissa.

Tässä tutkimuksessa esitetyt mallit antavat yleiskuvaa suomalaisen moottoriteliikenteen ominaisuuksista, mutta niiden käyttäminen väylien mitoituksessa edellyttää jatkotutkimuksia. Havaintopisteparvissa esiintyi suurta hajontaa keskinopeuksien suhteen. Lisäksi nopeusrajoitusalueen 120 km/h oikeanpuoleisen kaistan liikennevirran käyttäytymistä ei pystytty selittämään. Tämä tutkimus käsitteli ainoastaan vakaata liikennevirtaa. Epävakaa liikennevirran ja ruuhkautumisen ominaisuuksista on suositeltavaa suorittaa erillisiä tutkimuksia.

Tutkimustulosten pohjalta voidaan todeta HCM:n mallien olevan riittäviä kuvaamaan karkeasti suomalaista liikennevirtaa moottoritien linjaosuuksilla. Kalibrintimenetelmiä tulisi kehittää jatkossa myös muille väyläosille sekä liittymille. Tämän tutkimuksen perusteella on suositeltavaa tutkia teiden linjaosuuksien liikennevirran ominaisuuksia nopeusrajoitus- ja kaistakohtaisesti.

Lähdeluettelo

Akcelik, R., Roper, R. & Besley, M. 1999, Fundamental relationships for freeway traffic flows, Austroads, National Strategic Research Program, Research Report ARR 341, verkkojulkaisu (www.arb.com.au).

Brilon, W. Bressler, 2003 A. Traffic Flow on Freeway Upgrades, TRB 04-2953, Ruhr University Bochum. D-44780 Bochum, Germany

Enberg, Å., 1994. Ohituskaistatien liikennevirran perusominaisuudet, Tielaitoksen selvityksiä 31/1994. Helsinki: Painatuskeskus Oy ISBN 951- 47-9399-4

Haataja, J. 2000. Ohjeita Matlabin käyttöön, Kokoelma @CSC- ja SuperMenu – lehdissä ilmestyneistä artikkeleita, CSC –Tieteellinen laskenta Oy.

HBS 2001, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen. Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. Köln: ISBN 3-937356-44-4.

Innamaa, S., Huttunen, I., 1998. Kaistanvaihto moottoriteillä – kaistanvaihtomallit ja kenttätutkimus, Tielaitoksen selvityksiä 10/1998, Helsinki: Edita Oy. ISBN 951-726-412-7

Innamaa, S., Vanhanen, K., Pursula, M., 2000. Länsiväylän automaattisen liikenteenohjausjärjestelmän vaikutus liikennevirtaan, Tielaitoksen selvityksiä 53/2000. Helsinki: Edita Oy. ISBN 951-726-701-0

Liikennevirasto. 2011, Tietilasto 2010, Liikenneviraston tilastoja 6/2011. Helsinki: Edita Prima Oy. ISBN 978-952-255-699-B

Luttinen, R. T., 2001. Capacity and Level of Service on Finnish Two-Lane Highways, Finnra reports 18/2001, Finnish Road Administrator. Helsinki. Edita Oyj. ISBN 951-726-748-7.

Luttinen, R. T., Pursula, M. & Innanmaa, S., 2005. Liikennevirran ominaisuudet, Teknillinen korkeakoulu, Liikennelaboratorio. Helsinki. Picaset Oy. ISBN 951-22-7995-9

Mannan, M. S., Enberg, Å., 2000. Desired Speed on Finnish Freeways in Different Traffic Circumstances, Finnish National Road Administration, Traffic services. Helsinki: Edita Oy.

Mannan, M. S., Enberg, Å., 1998. Impact of Heavy Vehicles on Finnish Freeway Traffic Flow, Finnish National Road Administration, Traffic services. Helsinki: Edita Oy. ISBN 951-726-413-5

Nevala, R., Niittymäki, J., Rautio, J. Penttinen, M. & Rämä, P., 2003. Liikenteen palvelutason määritelmää, tekijöitä ja mittareita, esiselvitys, Tiehallinnon selvityksiä 42/2003. Vaasa: Multiprint Oy. ISBN 951-803-117-7

Ojala, V., Enberg, Å. & Luttinen, R.T., 2007. Tieliikenteen palvelutason määrittäminen, Katsaus Euroopan maiden käytäntöihin, Tiehallinnon selvityksiä 55/2007. Helsinki: Edita Prima Oy. ISBN 978-951-803-997-9. TIEH 3201080-v

Ristikartano, J. 2010. Tieliikenteen ajokustannusten laskenta 2010, Liikenneviraston ohjeita 22/2010, Liikennevirasto. Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi). ISBN 978-952-255-040-8

Roess, R., 2009a Freeway Speed-Flow Curves, Polytechnic Institute of NYU, Member of the NCHRP 3-92 Panel, sähköinen tutkimusmuistio.

Roess, R., 2009b Service Flow Rates, Service Volumes and Daily Service Volumes for Freeways and Multilane Highways in 2010 HCM, Polytechnic Institute of NYU, Member of the NCHRP 3-92, production of the 2010 highway capacity manual, white paper.

Tiehallinto, 2003. IVAR -hjelmiston käyttöopas, Suunnitteluvaiheen ohjaus, Vaasa: Multiprint Oy. ISBN 951-803-067-7

TRB, Transportation Research Board 2000, the National Academy of Sciences, HCM 2000 Highway Capacity Manual 2000, Washington, DC.

TRB, Transportation Research Board 2010, the National Academy of Sciences, HCM 2010 Highway Capacity Manual 2010, Washington, DC, ISBN 978-0-309-16077-3

Laki:

Finlex, 2005. (Valtioneuvoston asetus maanteistä (924/2005) 1 artikla 1 mom.):
http://www.finlex.fi/fi/sopimukset/sopsteksti/1986/19860030/19860030_2

Liiteluettelo

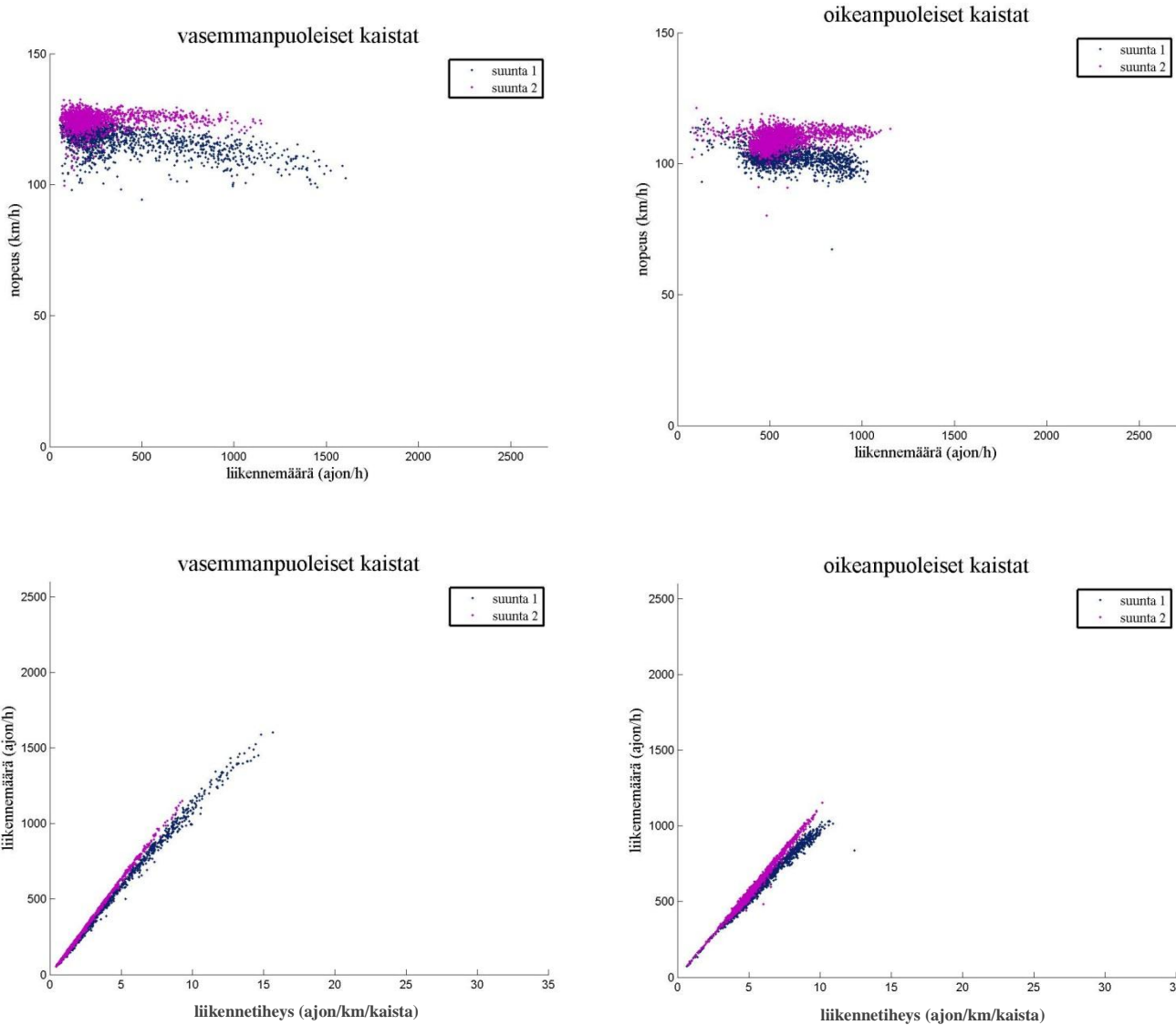
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

Liite 2: Nopeusrajoituksen mukaisen aineistojaottelun käyrien sovitukset

Liite 1

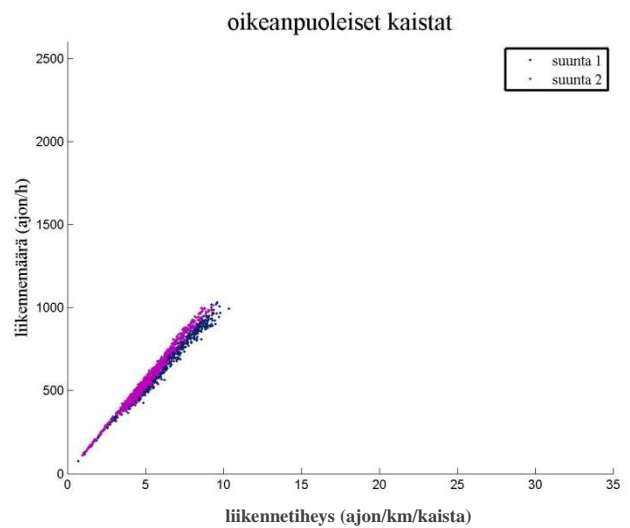
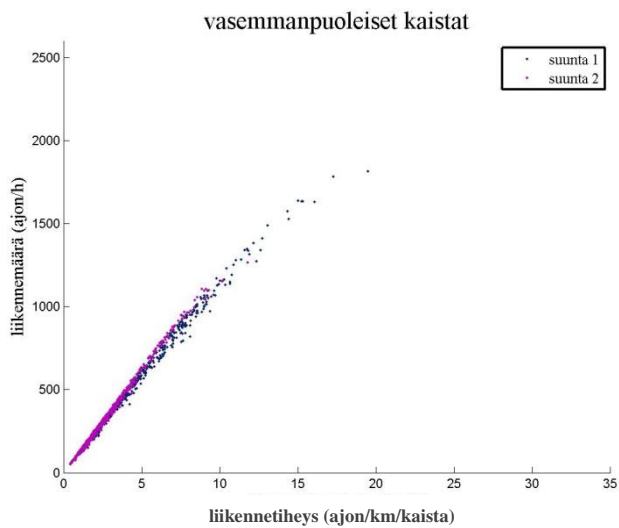
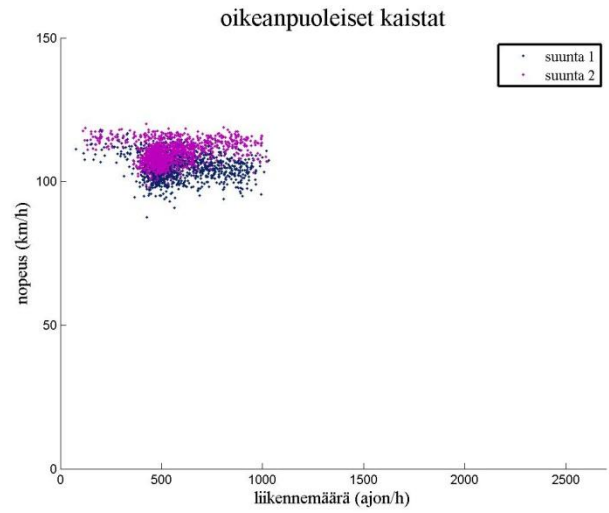
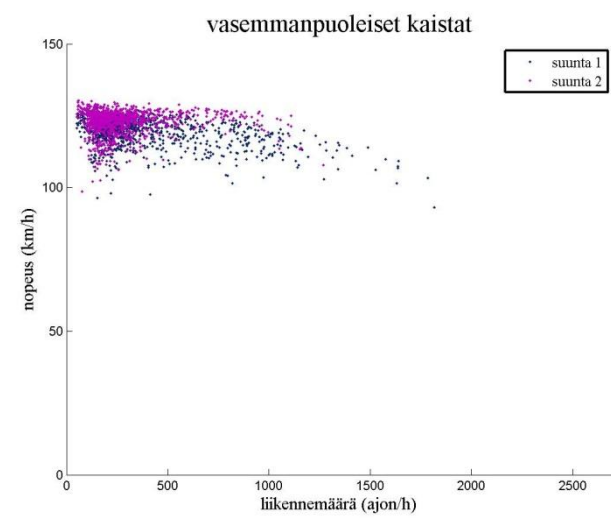
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 104, Palojärvi, Vihti. Nopeusrajoitus 120 km/h



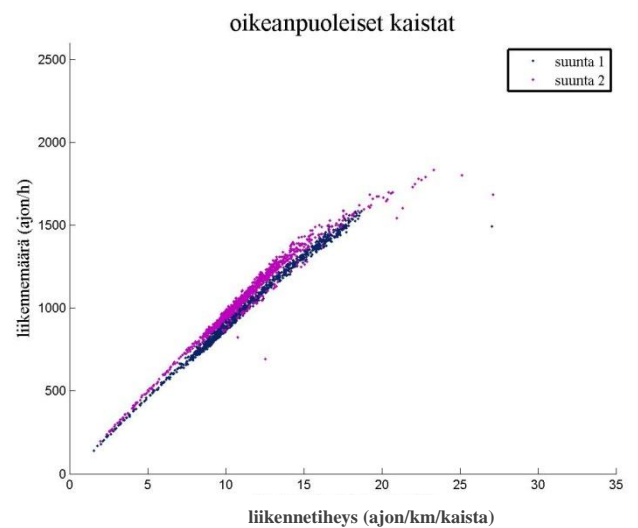
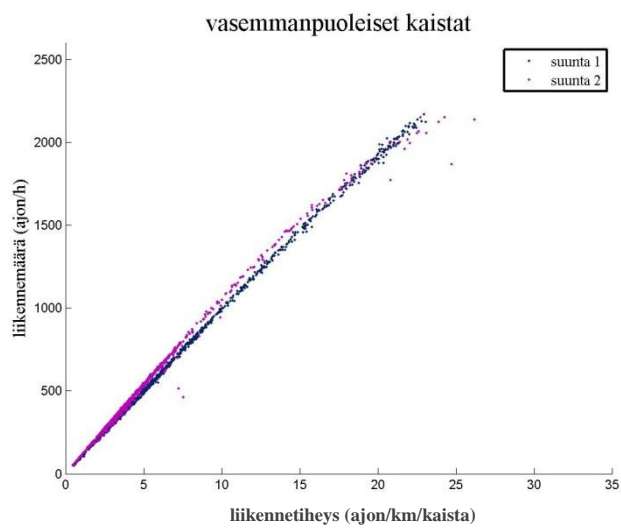
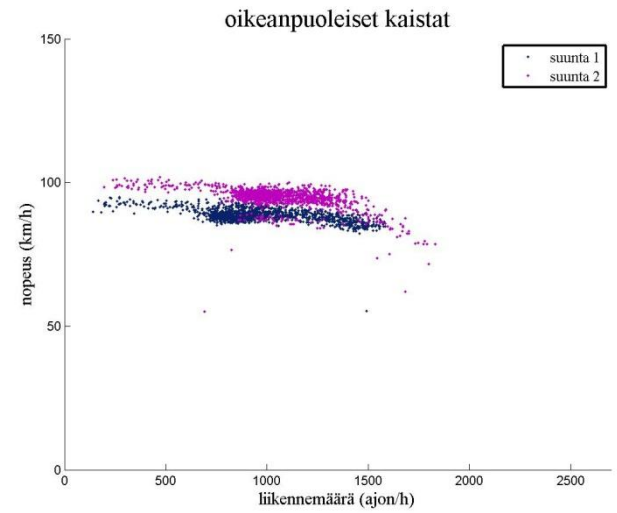
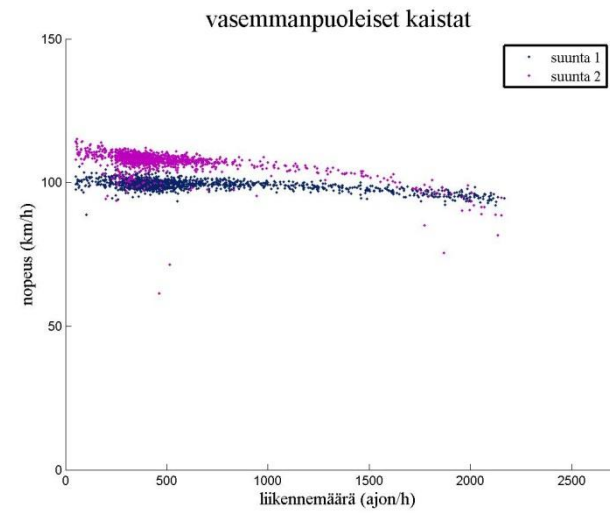
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 108, Karhukorpi, Nurmijärvi. Nopeusrajoitus 120 km/h



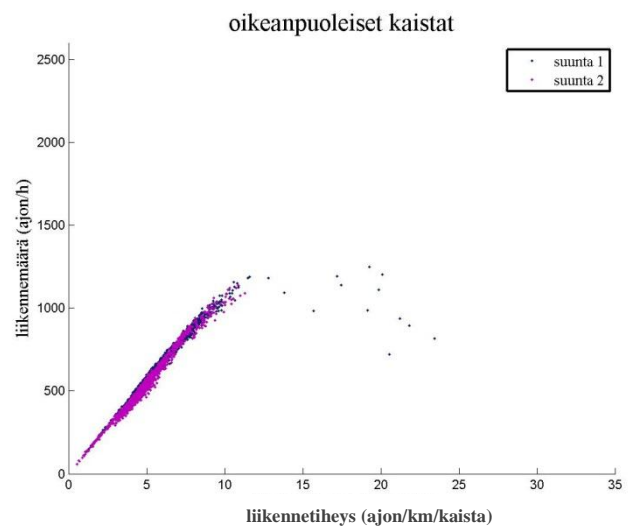
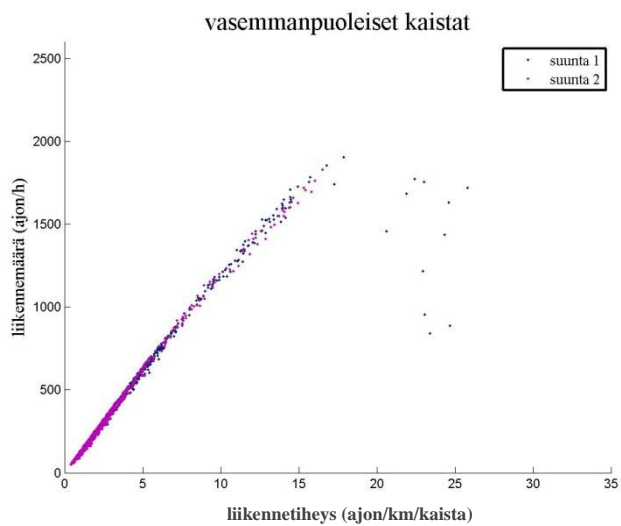
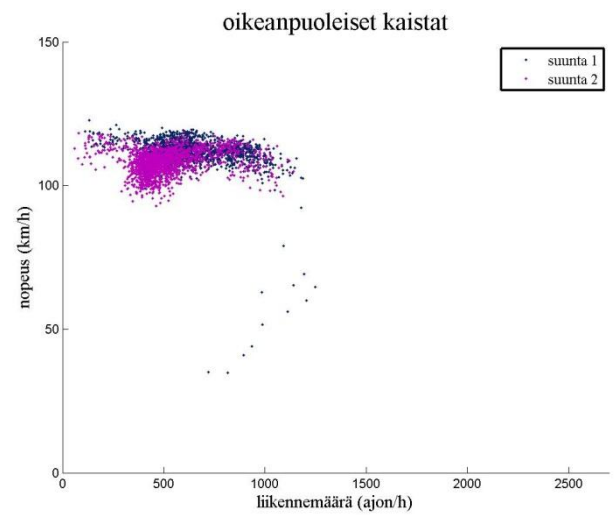
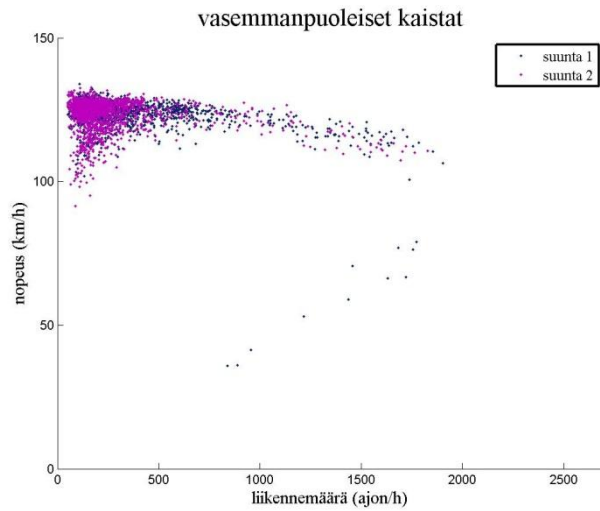
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 109, Jakomäki, Helsinki. Nopeusrajoitus 100 km/h



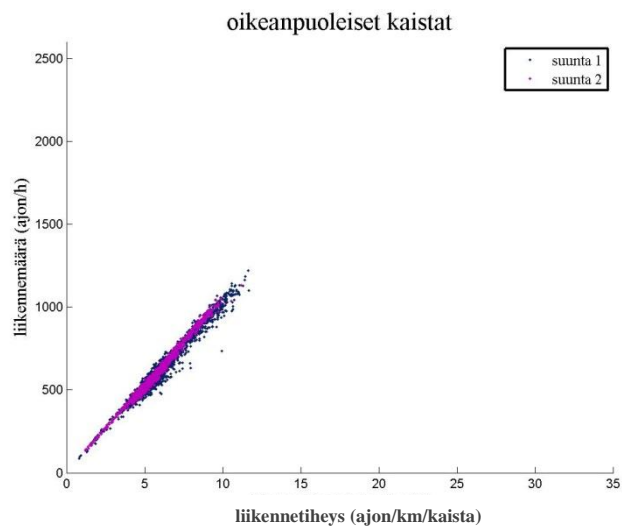
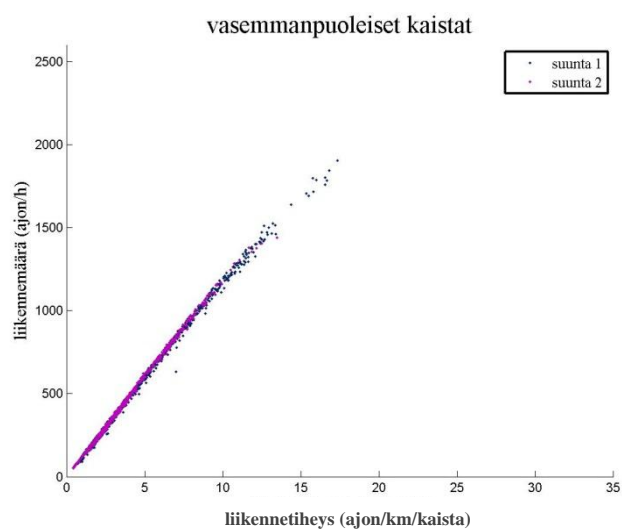
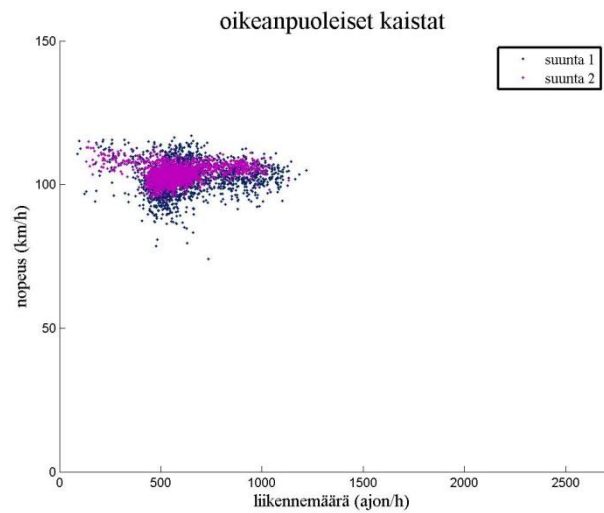
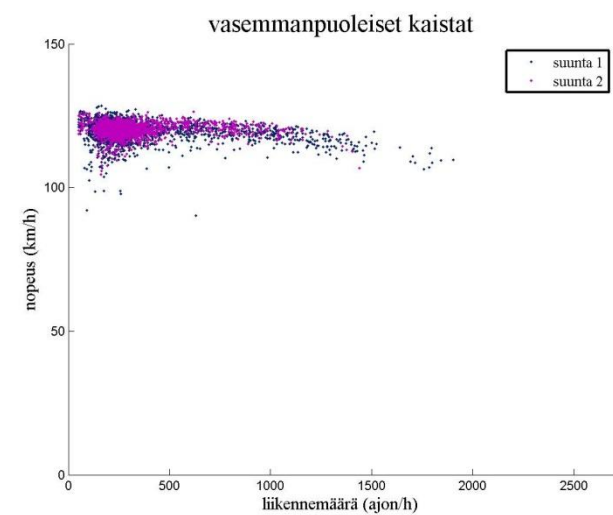
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 110, Hakari, Mäntsälä. Nopeusrajoitus 120 km/h



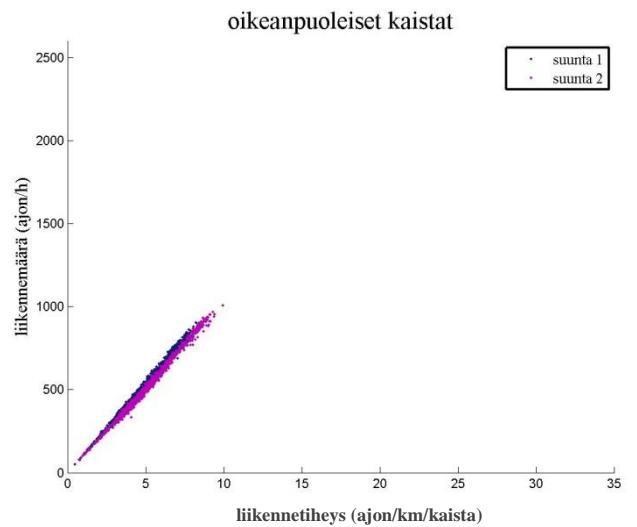
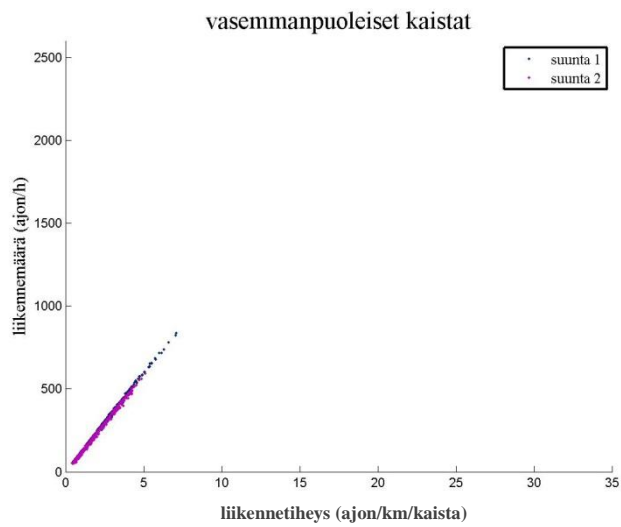
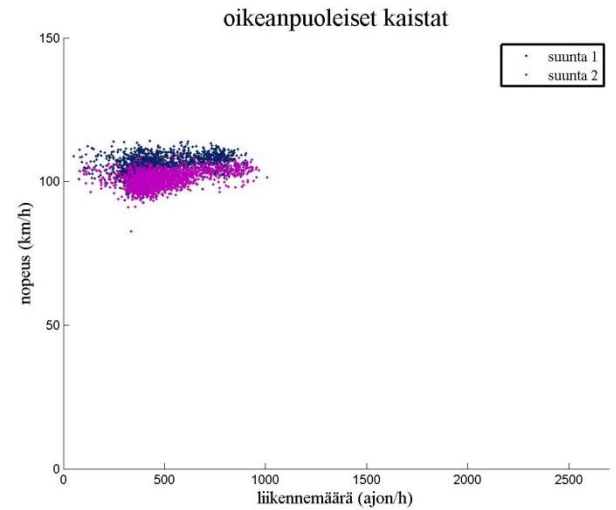
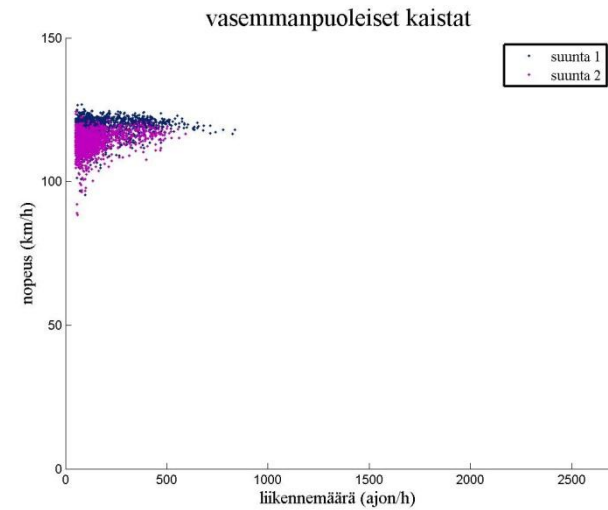
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 112, Treksilä, Porvoo. Nopeusrajoitus 120 km/h



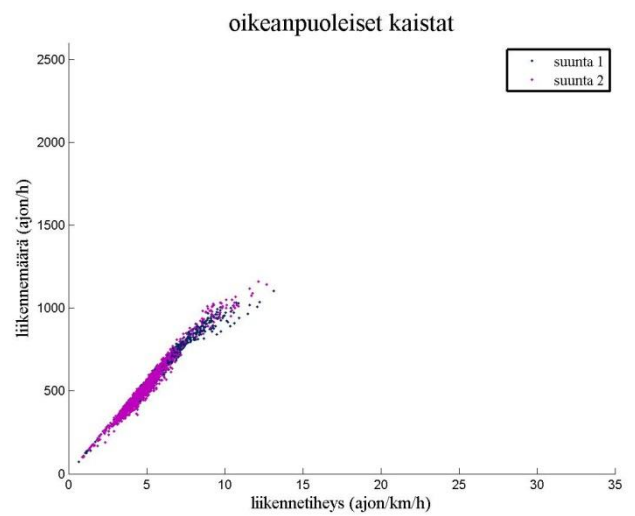
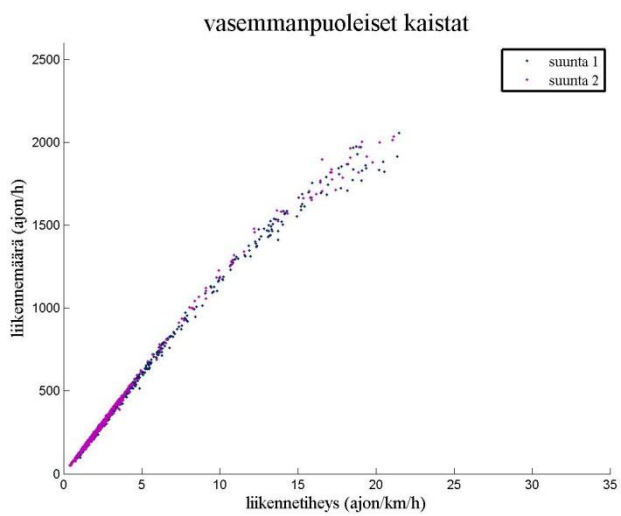
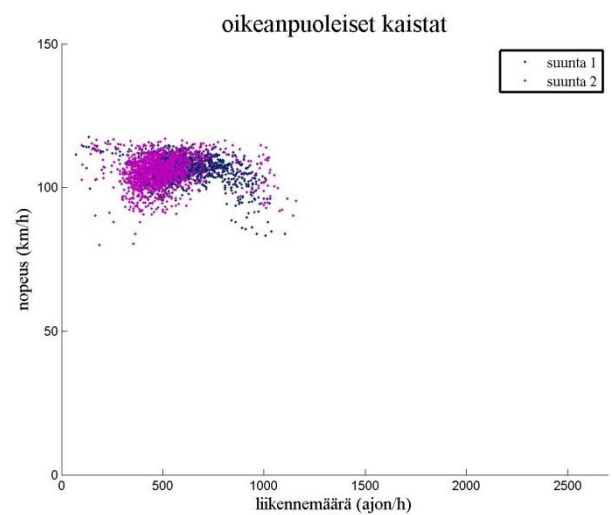
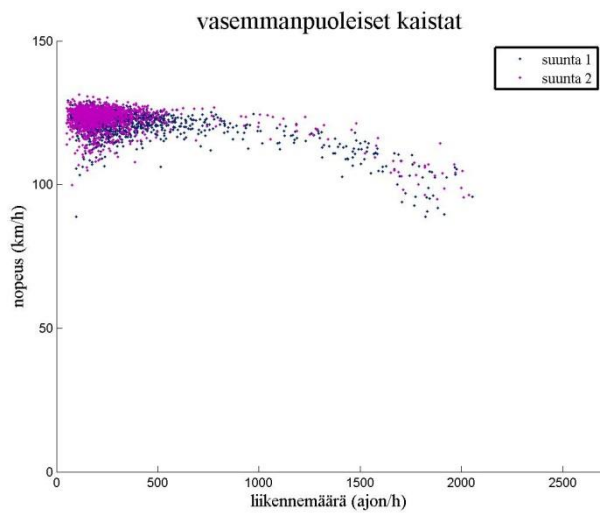
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 179, Fazerila, Vantaa. Nopeusrajoitus 120 km/h



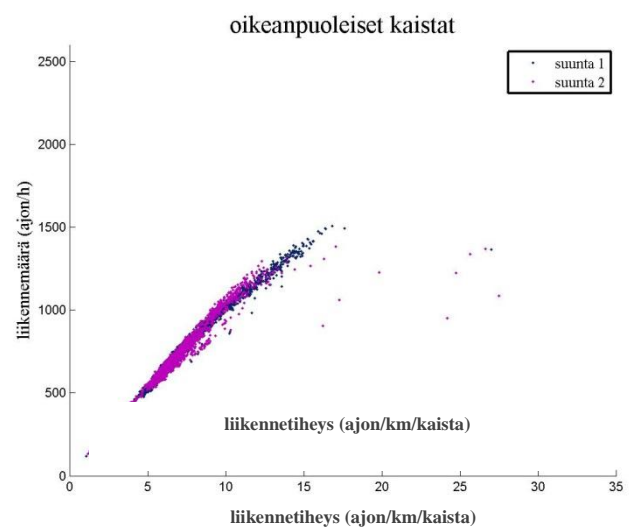
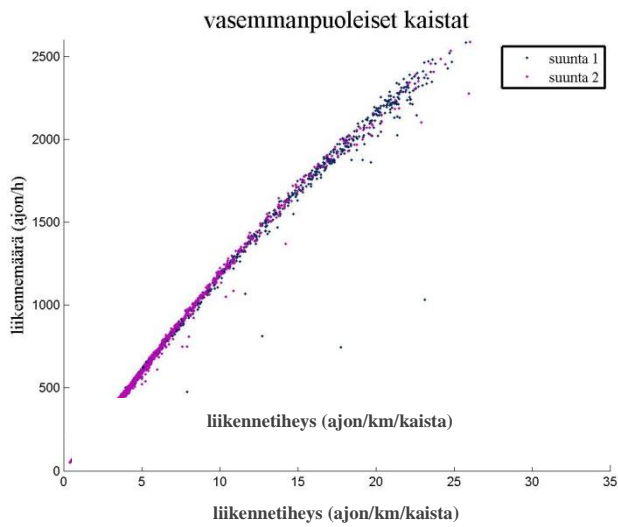
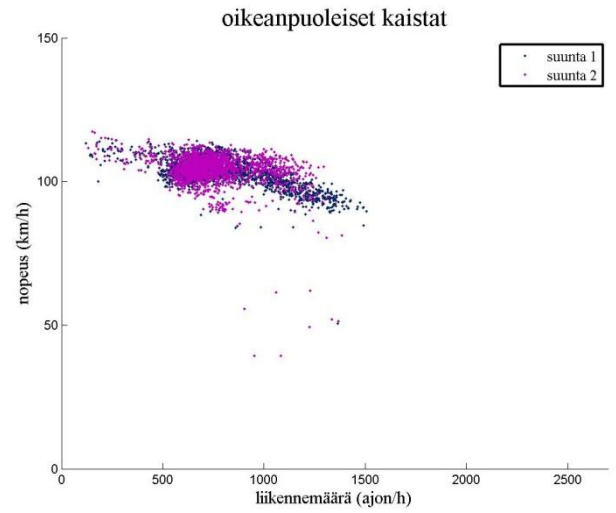
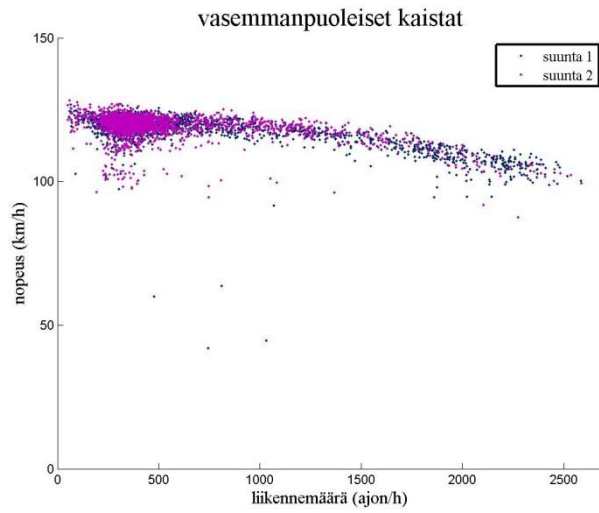
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 142, Levanto, Mäntsälä. Nopeusrajoitus 120 km/h



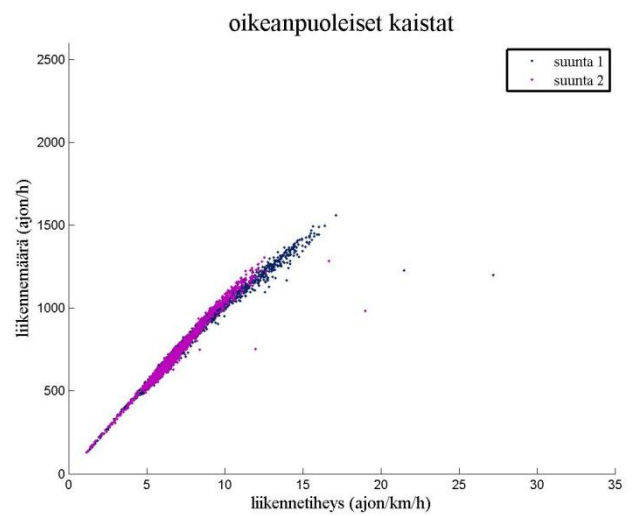
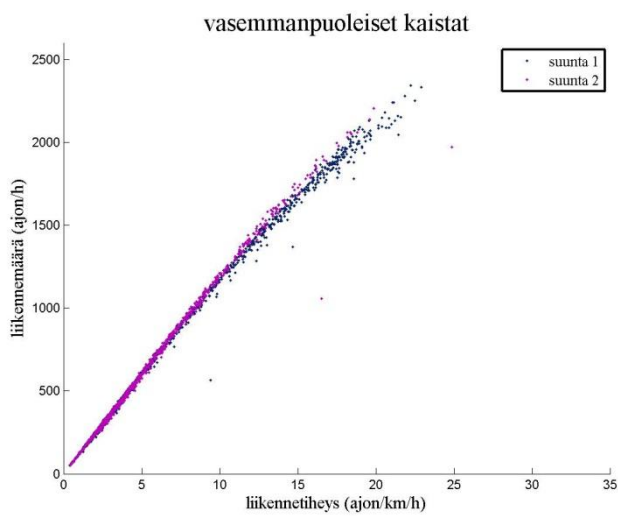
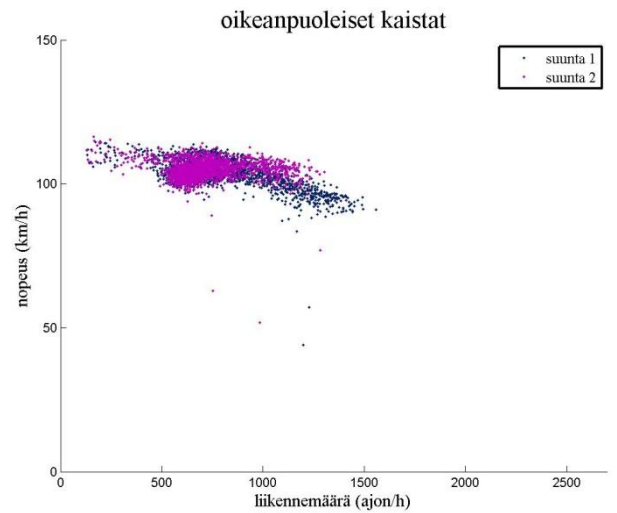
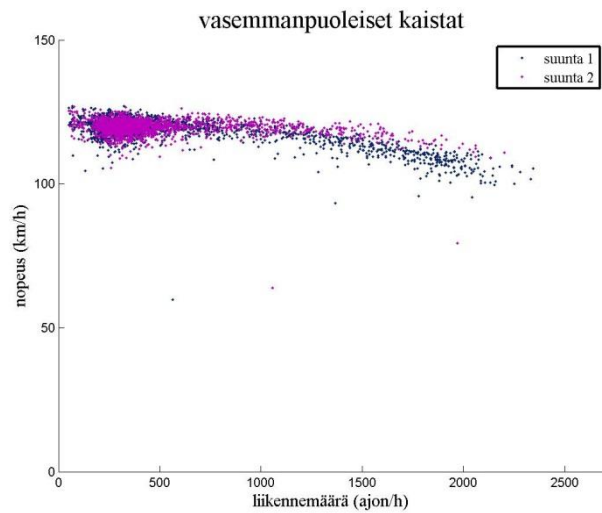
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 191, Kolmiranta, Kirkkonummi. Nopeusrajoitus 120 km/h



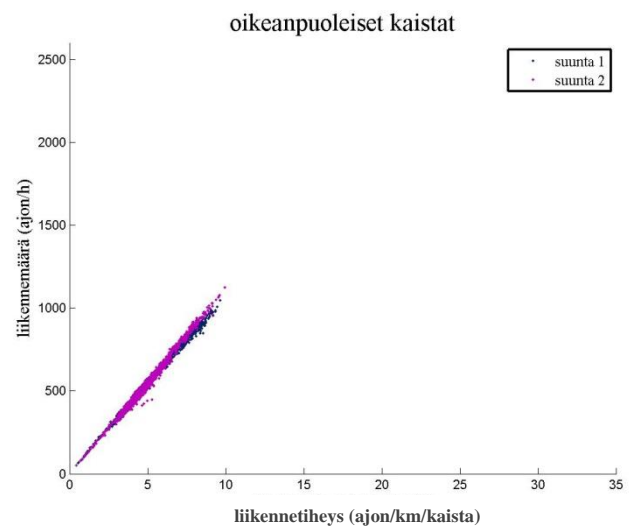
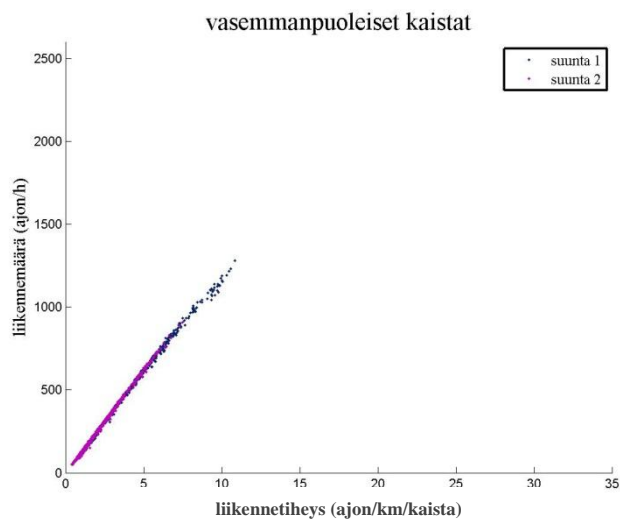
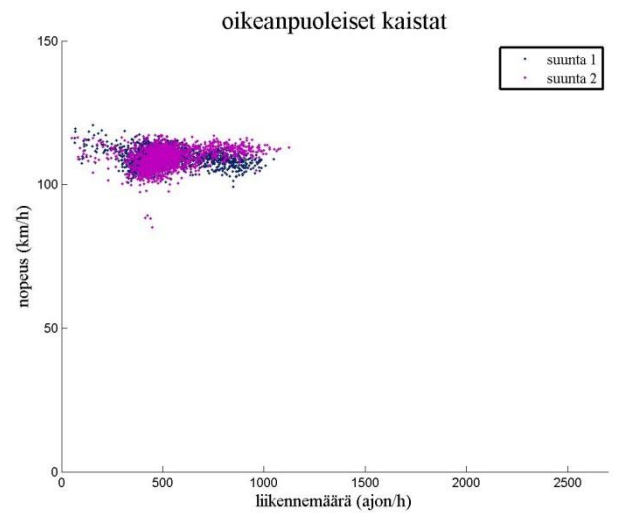
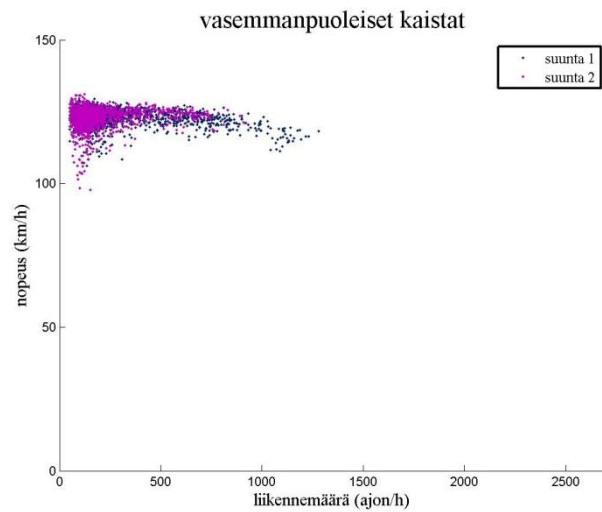
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 192, Veikkola, Kirkkonummi. Nopeusrajoitus 120 km/h



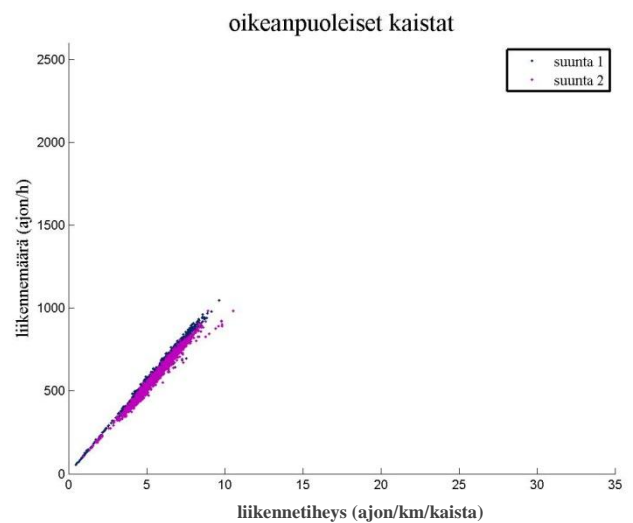
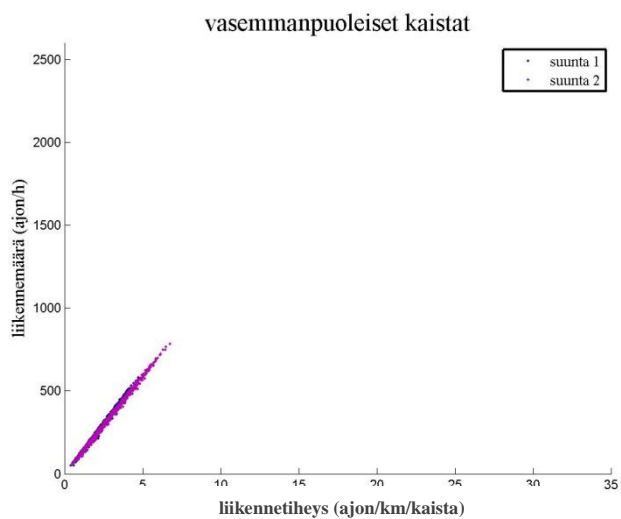
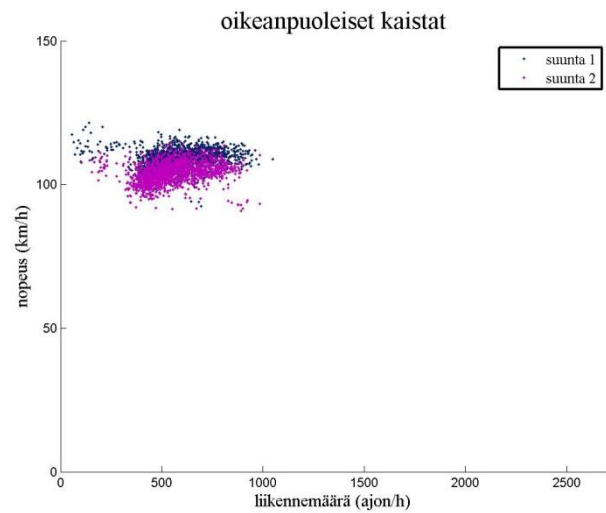
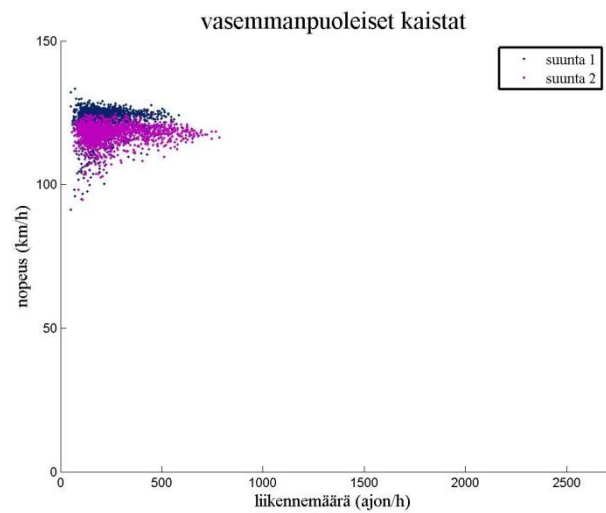
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 193, Hevoskallio, Lohja. Nopeusrajoitus 120 km/h



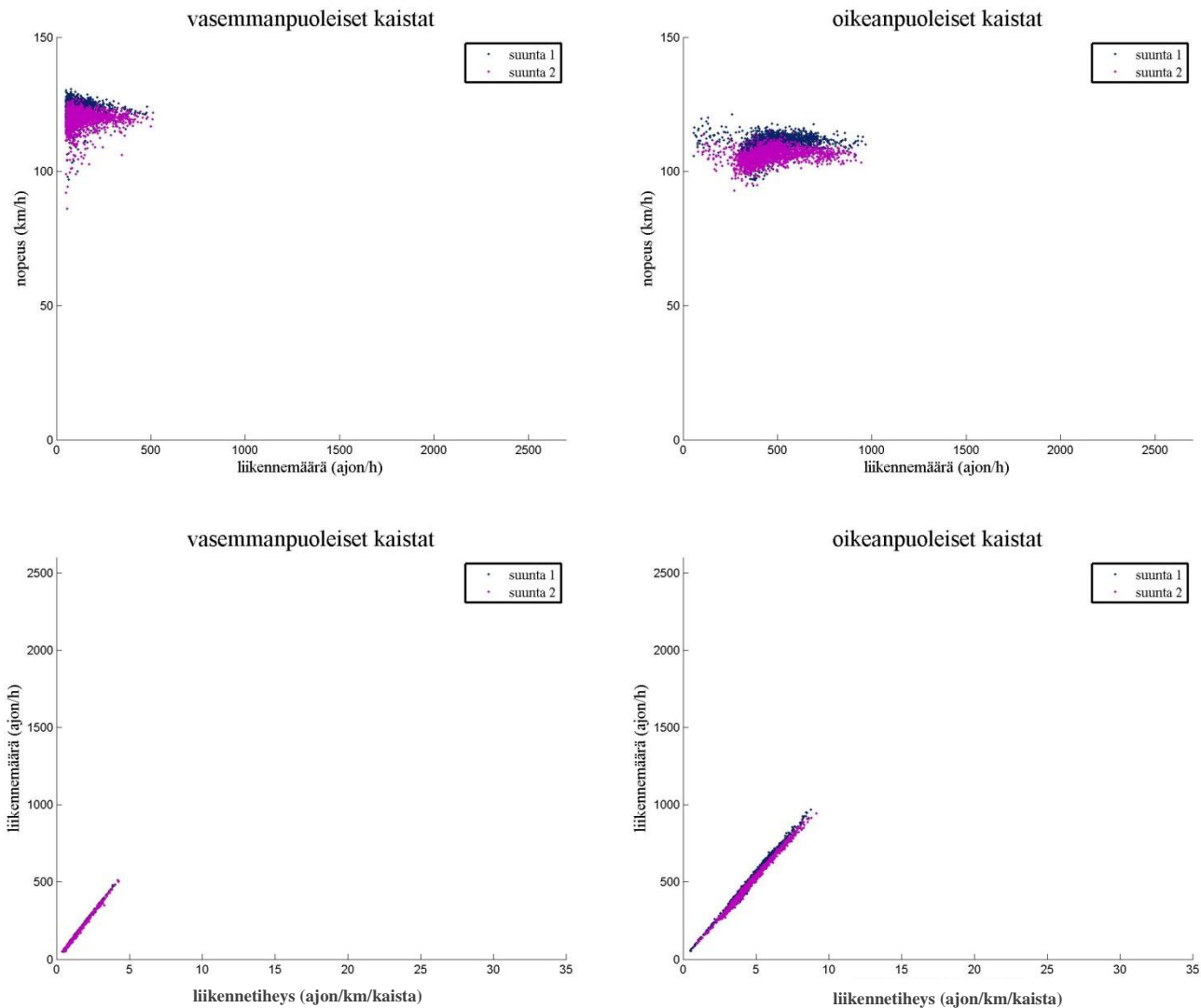
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 227, Kirismäki, Kaarina. Nopeusrajoitus 120 km/h



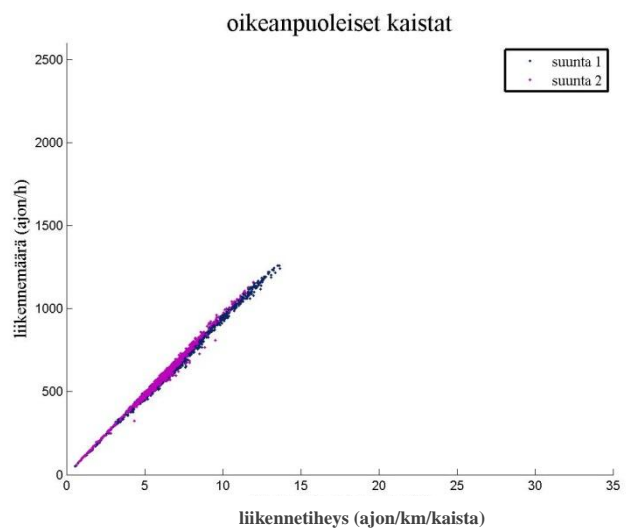
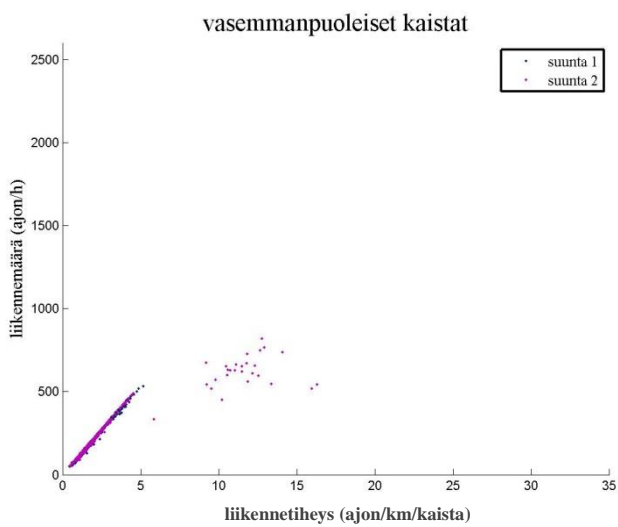
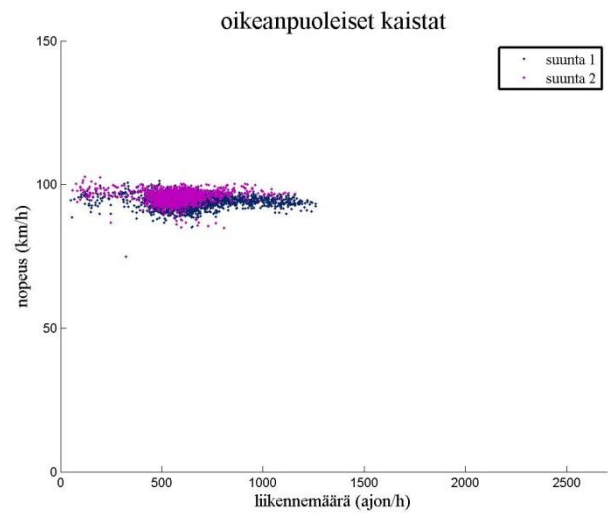
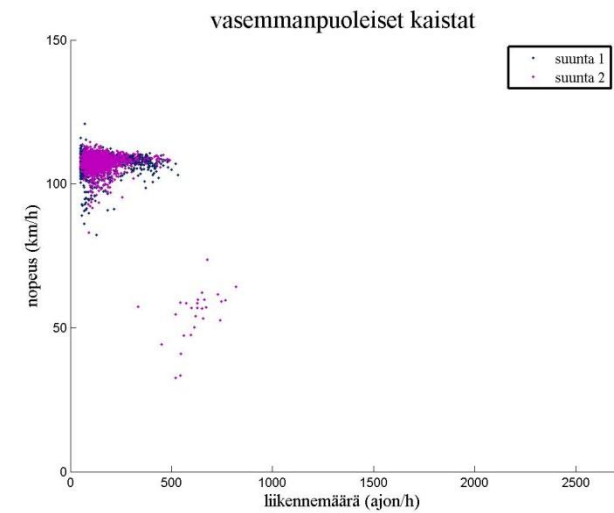
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 239, Kaarina, Kaarina. Nopeusrajoitus 120 km/h



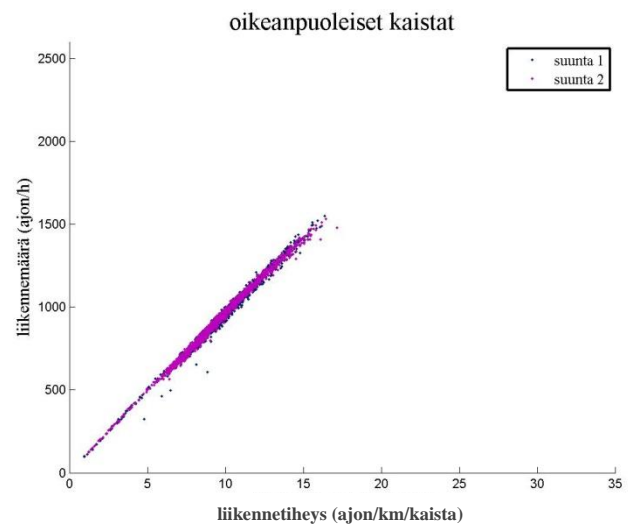
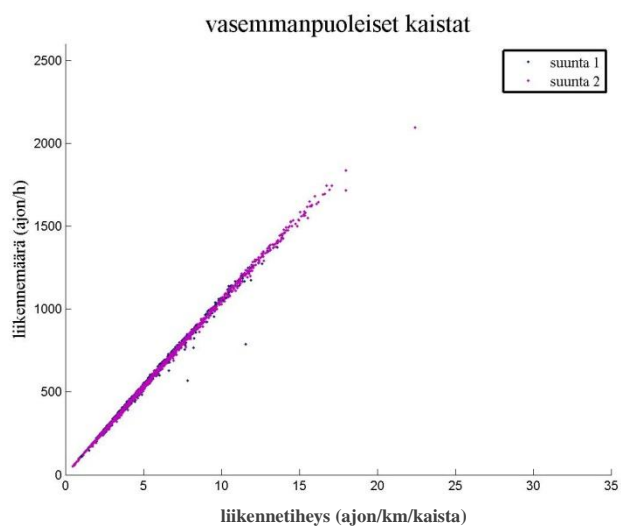
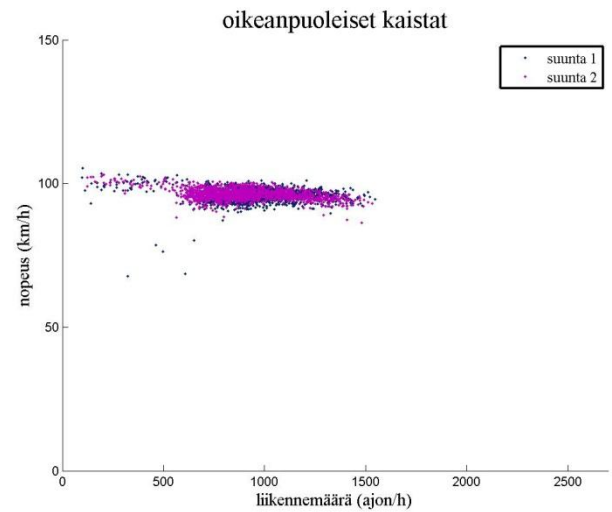
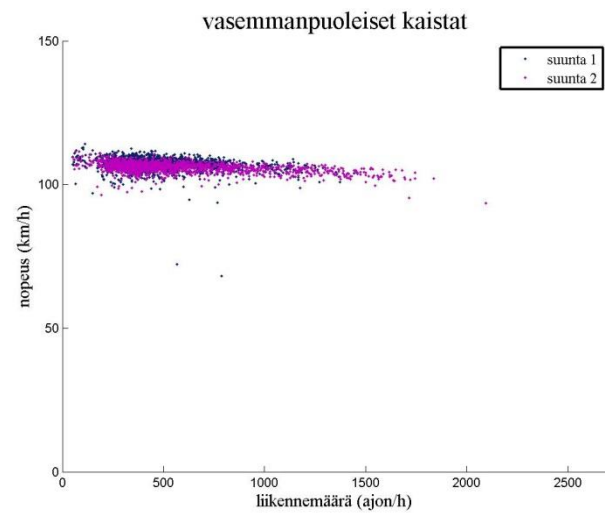
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 249, Ihala, Raisio. Nopeusrajoitus 100 km/h



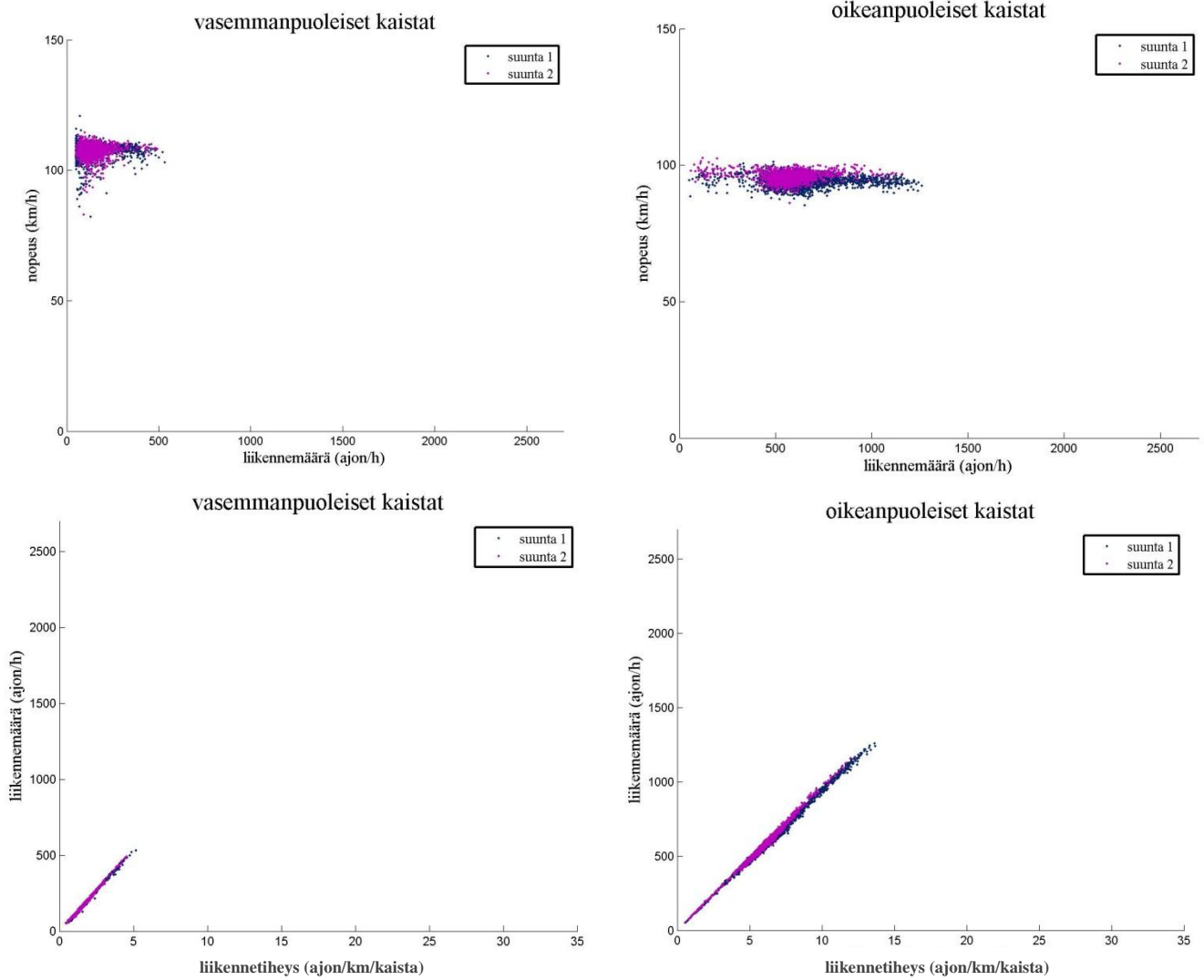
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 401, Sääksjärvi, Lempäälä. Nopeusrajoitus 100 km/h



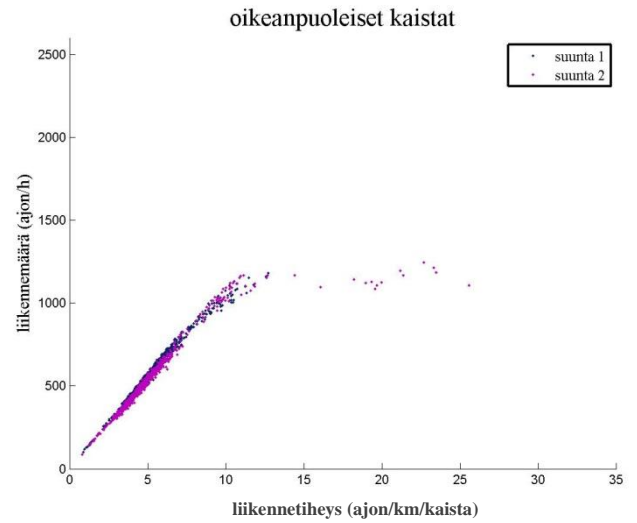
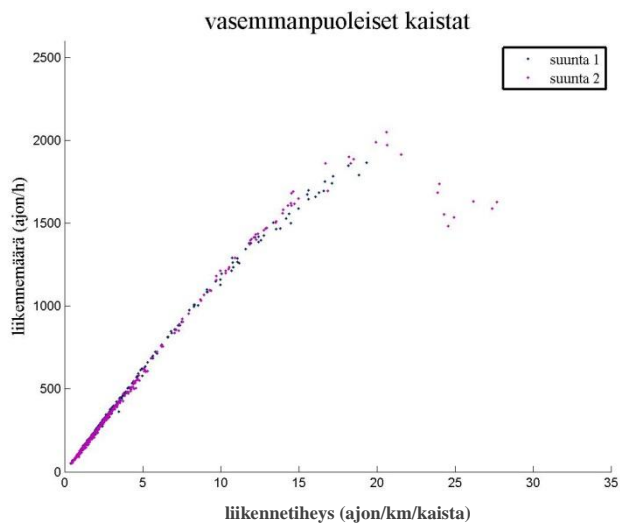
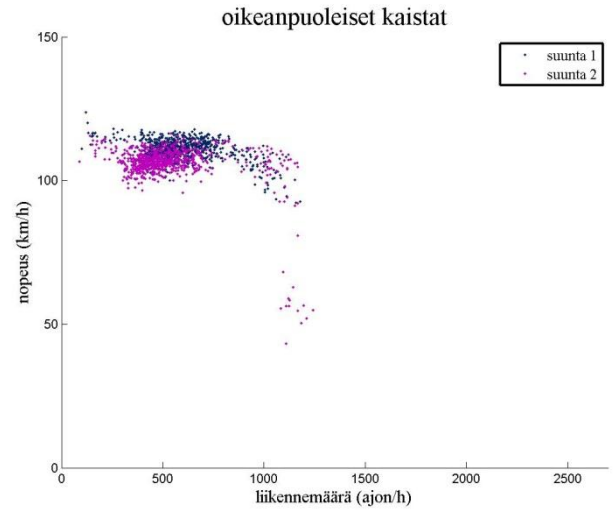
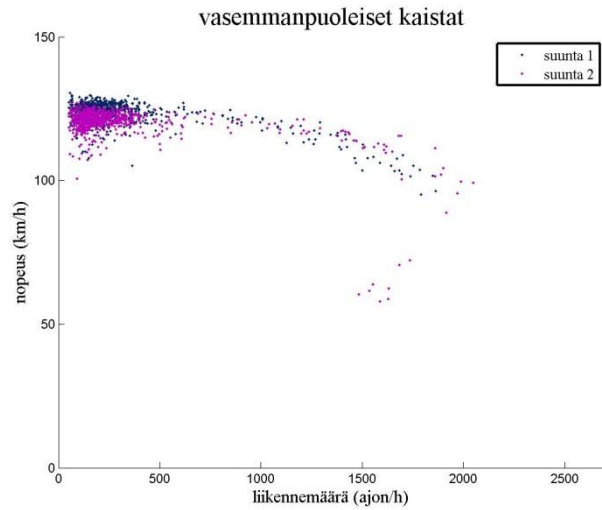
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 429, Herajoki, Riihimäki. Nopeusrajoitus 120 km/h



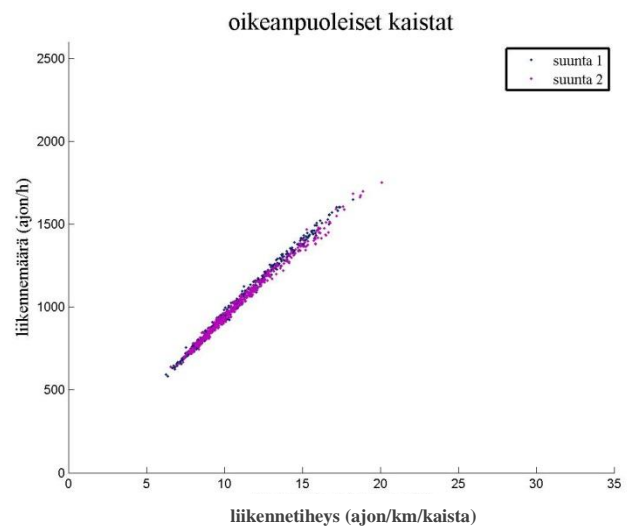
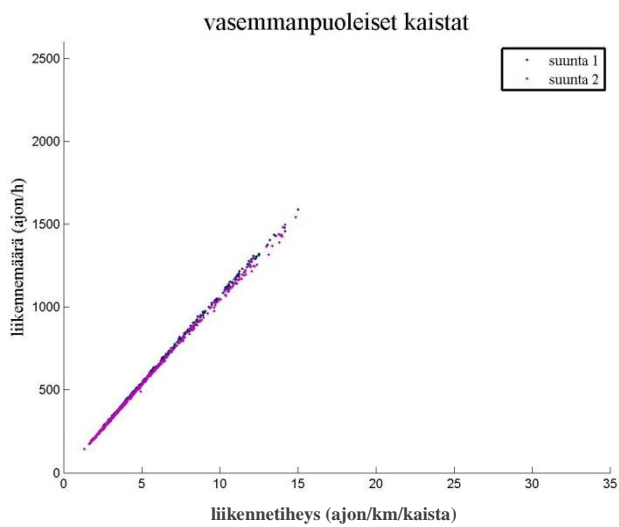
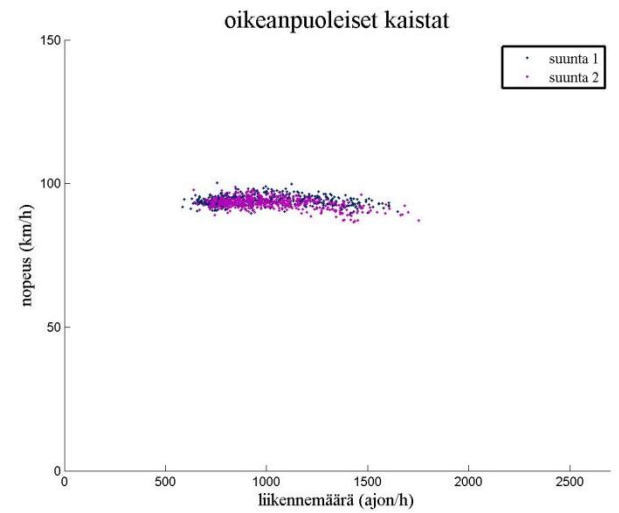
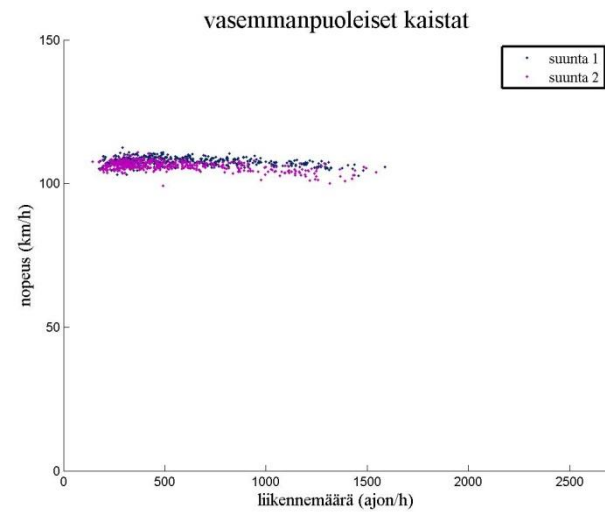
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 424, Miekkio, Hollola. Nopeusrajoitus 120 km/h



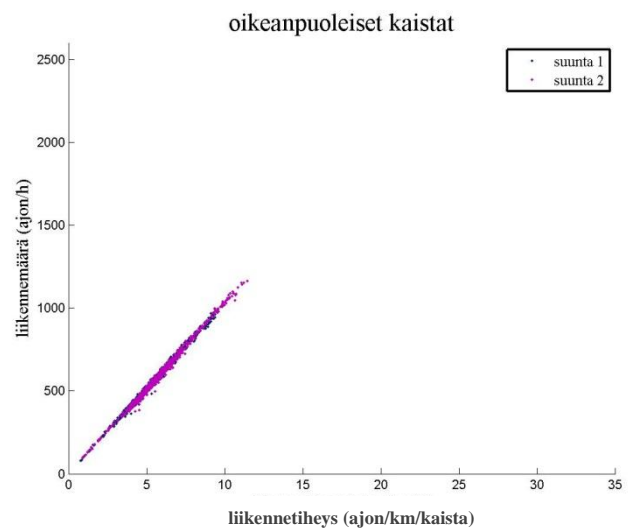
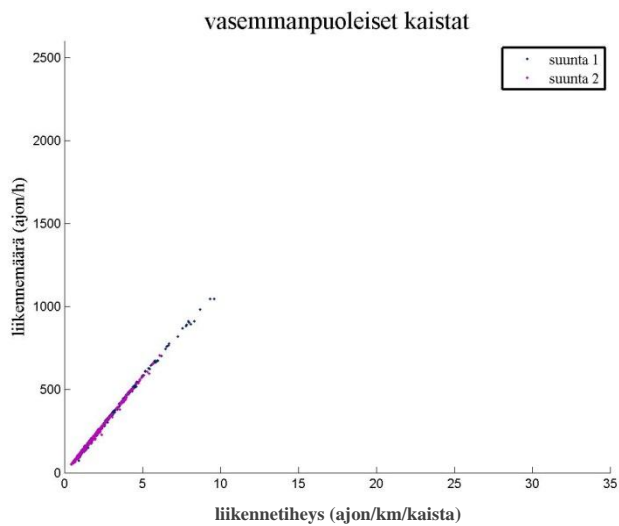
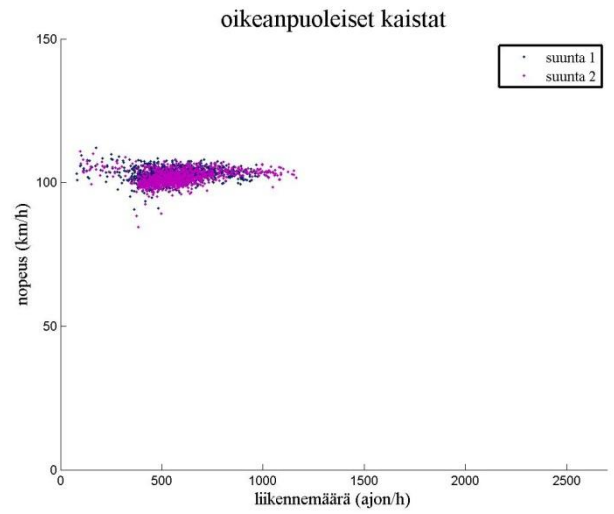
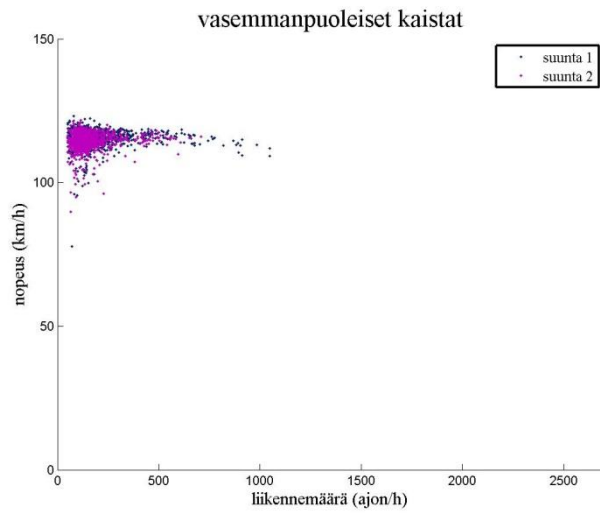
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 435, Karkuvuori, Tampere. Nopeusrajoitus 100 km/h



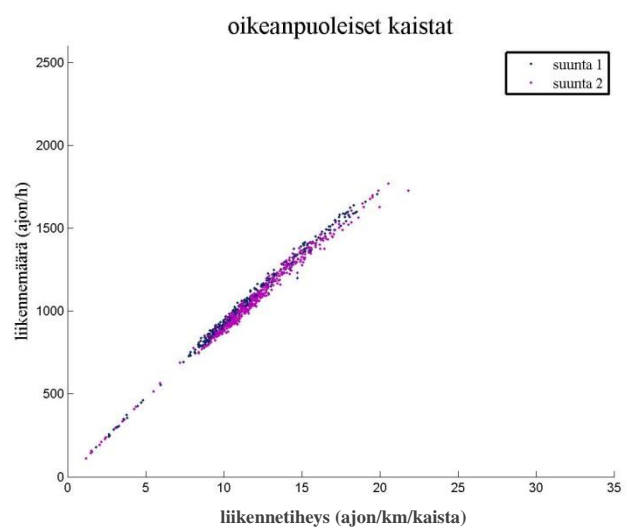
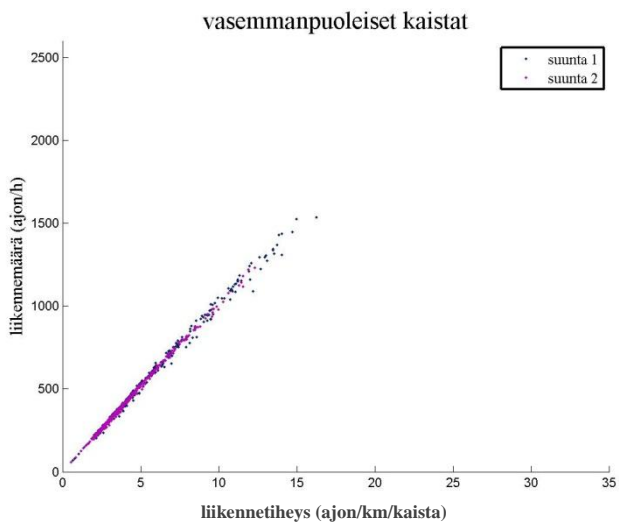
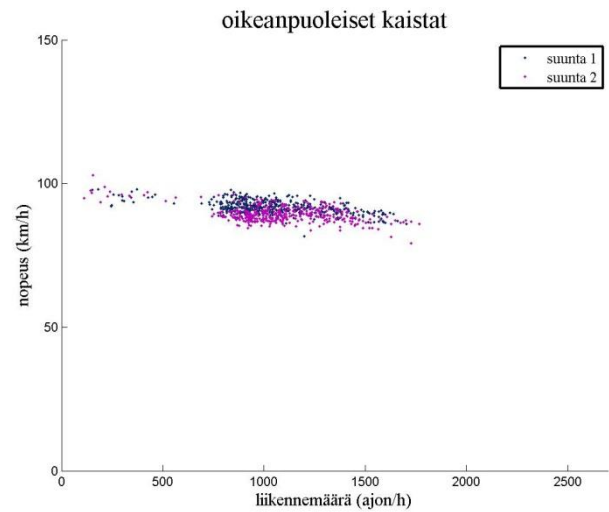
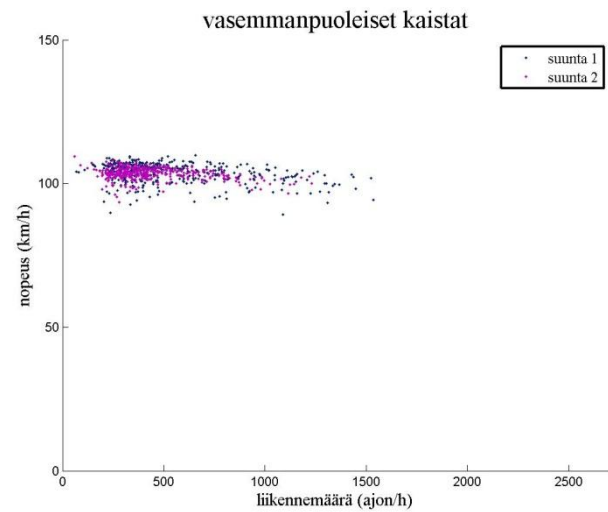
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 437, Ojoinen, Hämeenlinna. Nopeusrajoitus 100 km/h



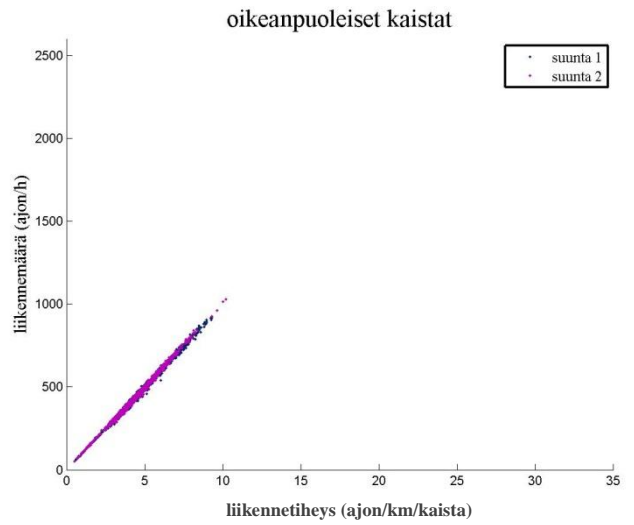
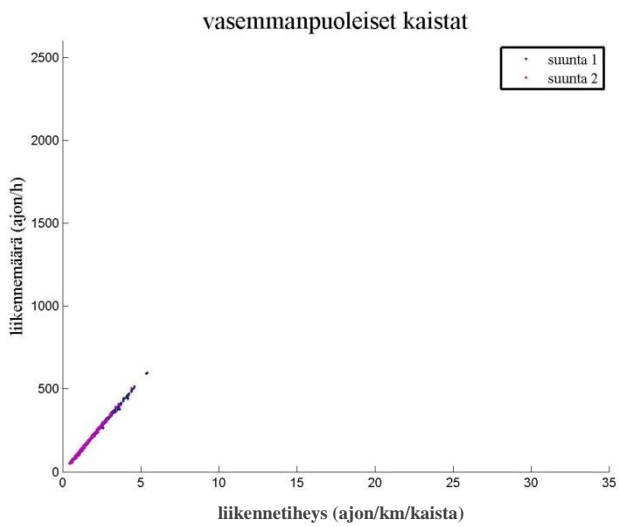
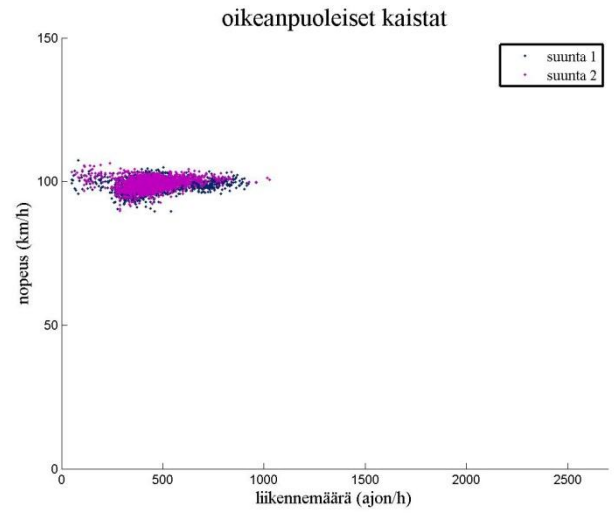
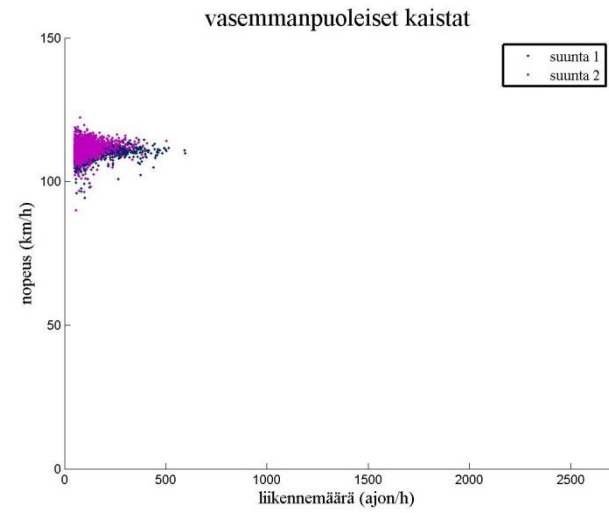
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 449, Härmälä, Tampere. Nopeusrajoitus 100 km/h



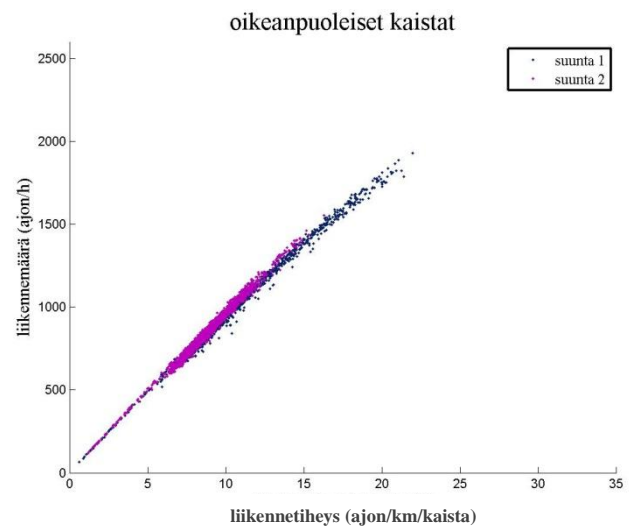
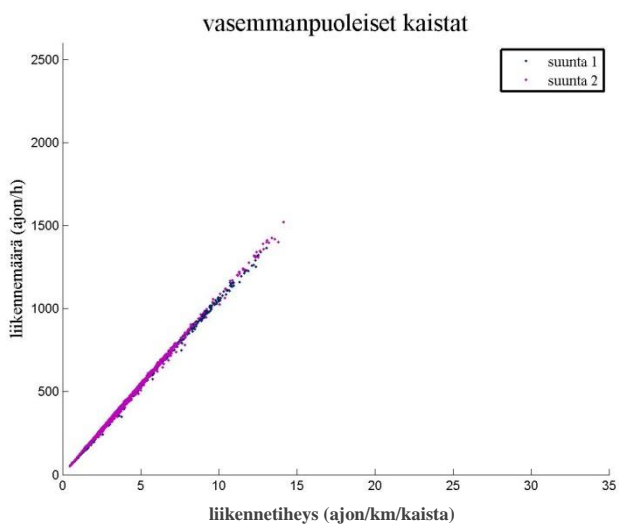
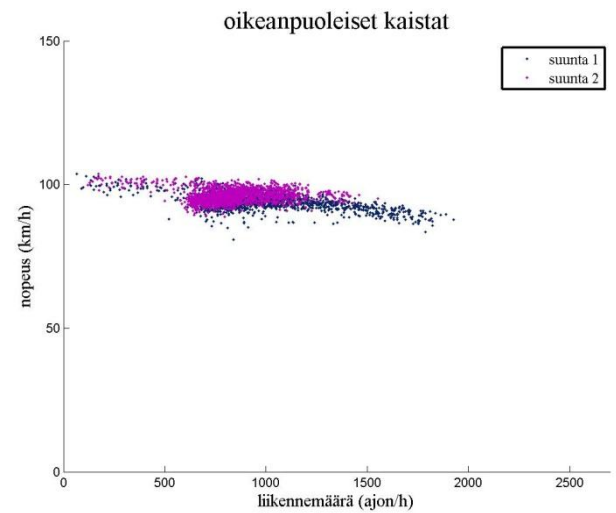
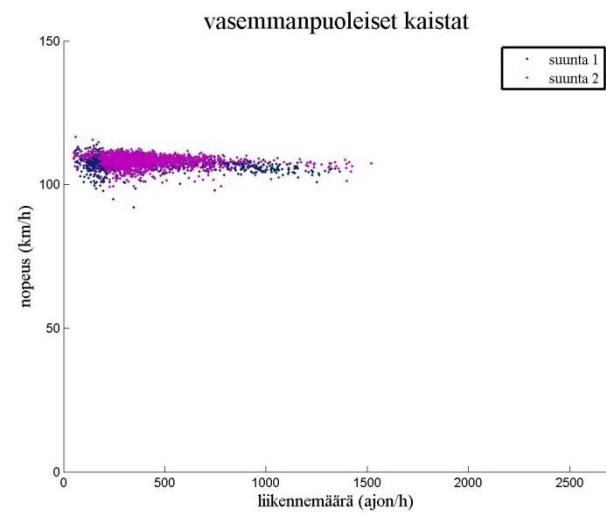
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 450, Lamminpää, Tampere. Nopeusrajoitus 100 km/h



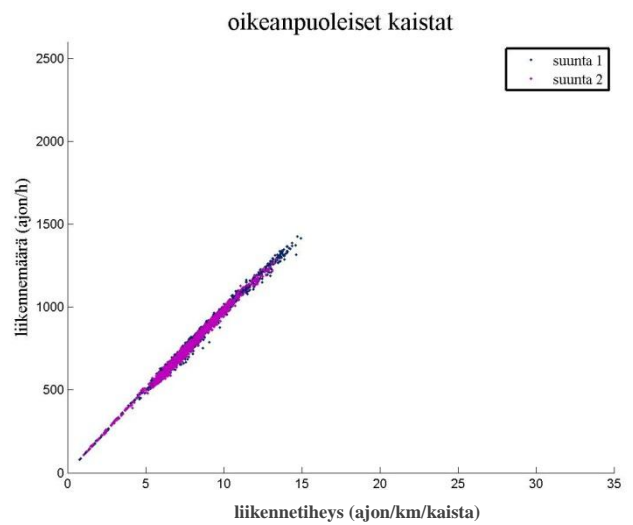
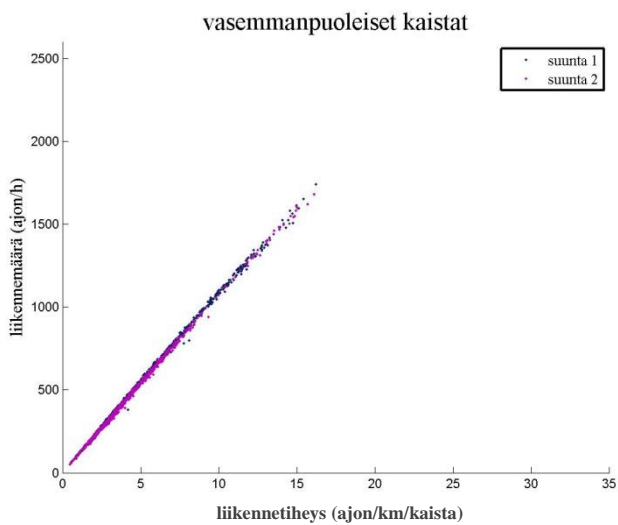
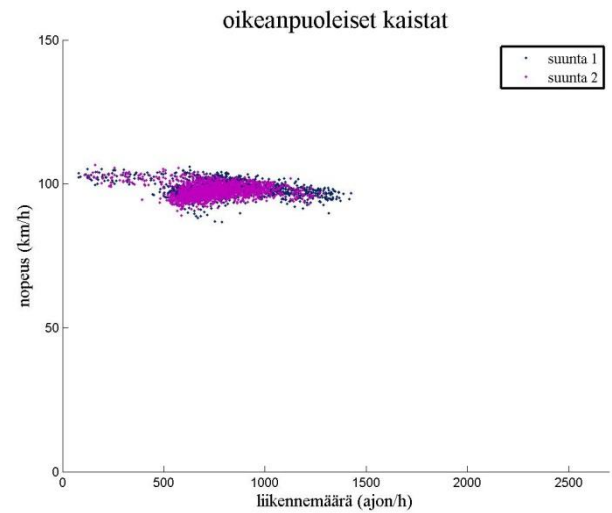
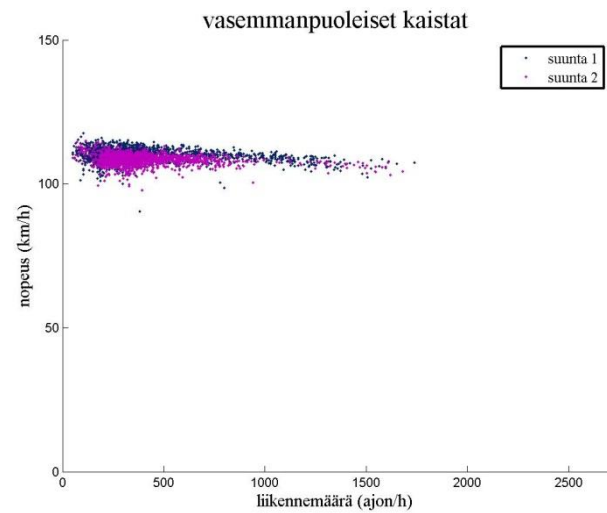
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 462, Rajasalmen silta, Nokia. Nopeusrajoitus 100 km/h



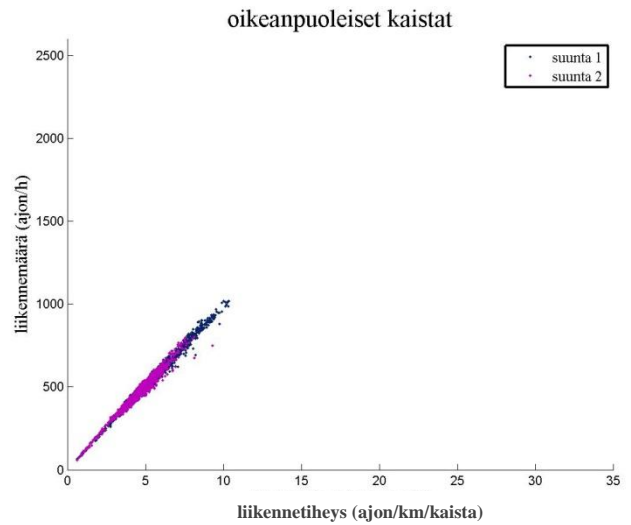
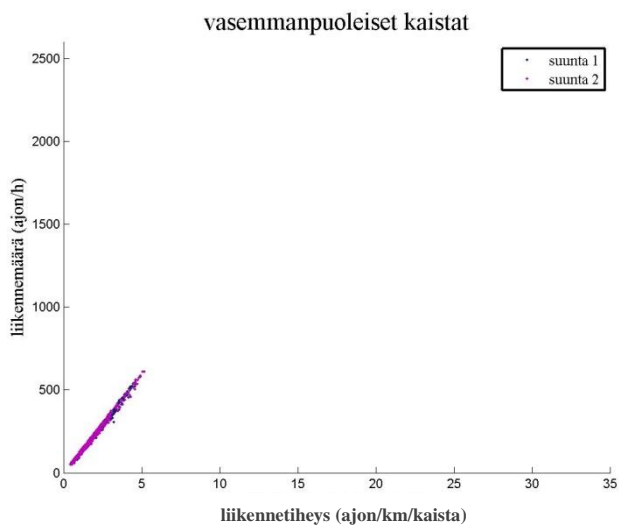
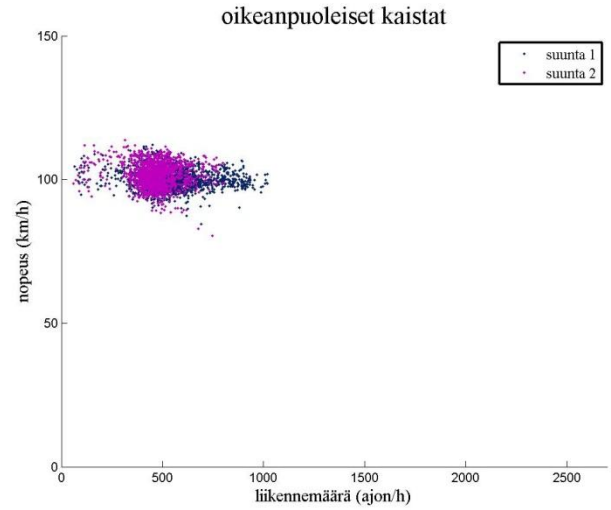
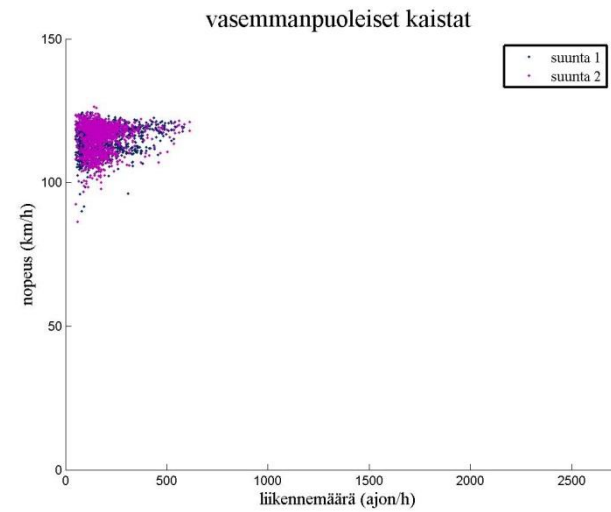
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 463, Sankila, Pirkkala. Nopeusrajoitus 100 km/h



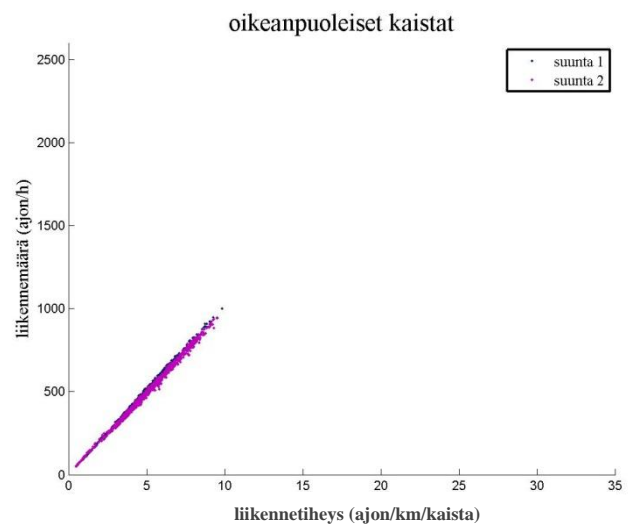
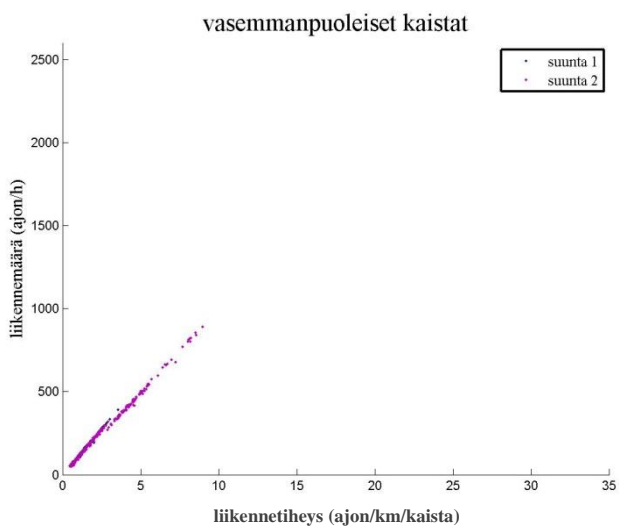
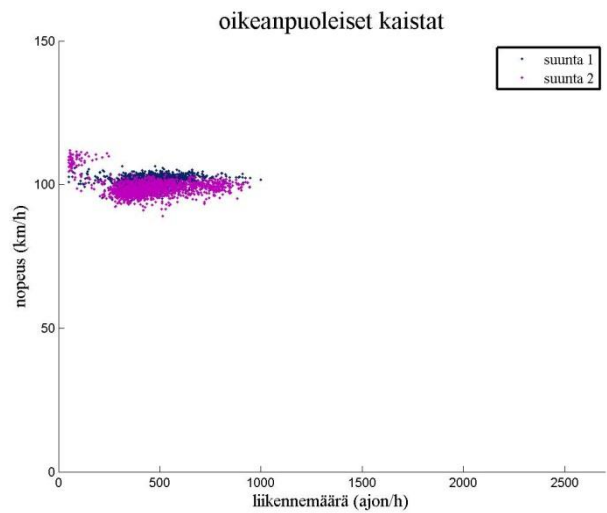
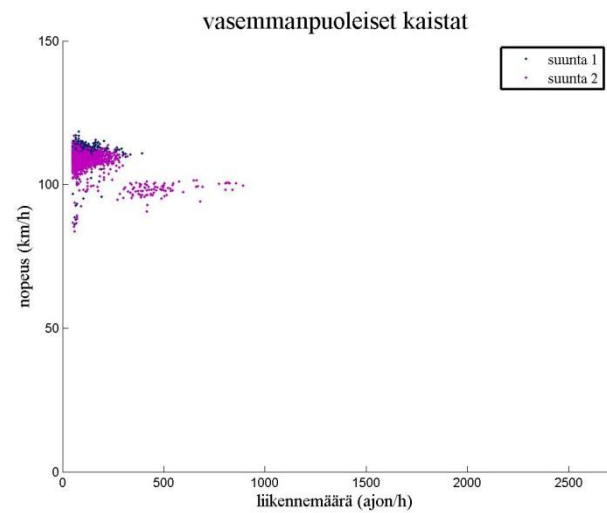
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 572, Valkeala, Kouvola. Nopeusrajoitus 100 km/h



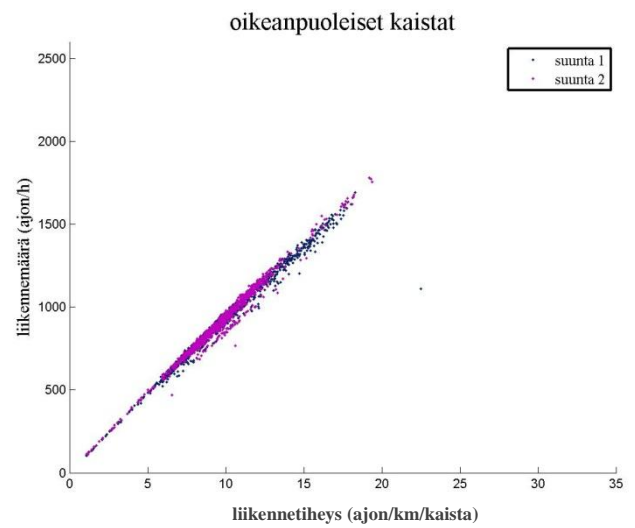
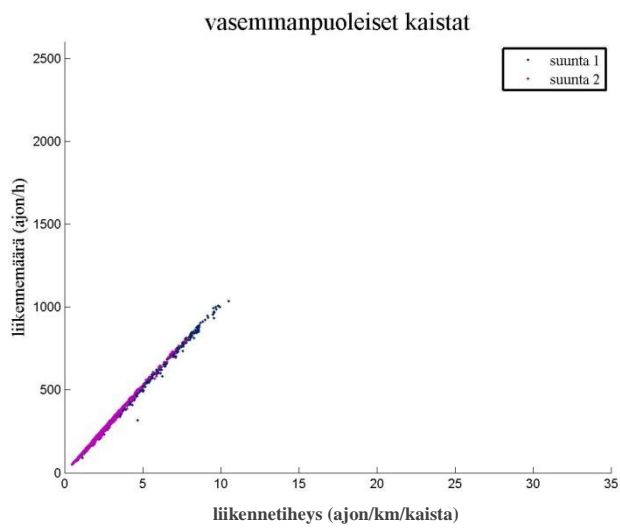
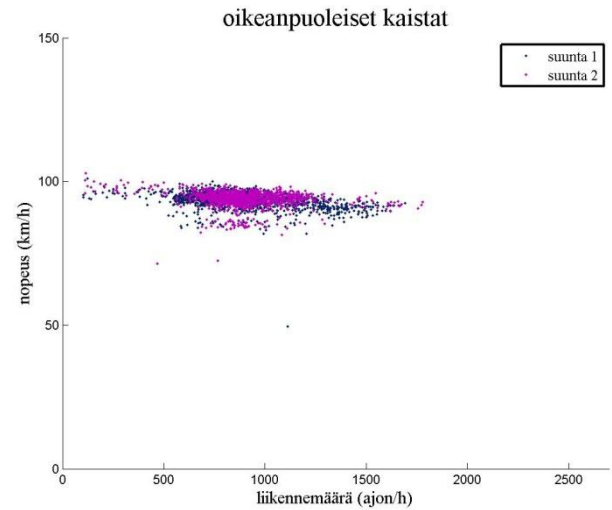
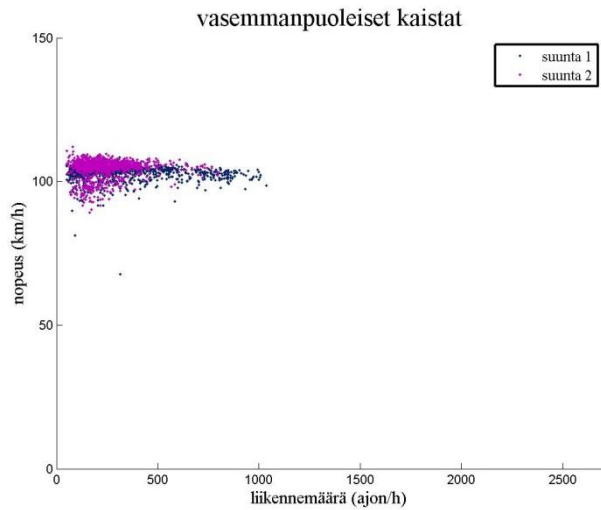
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 825, Hiltulanlahti, Kuopio. Nopeusrajoitus 100 km/h



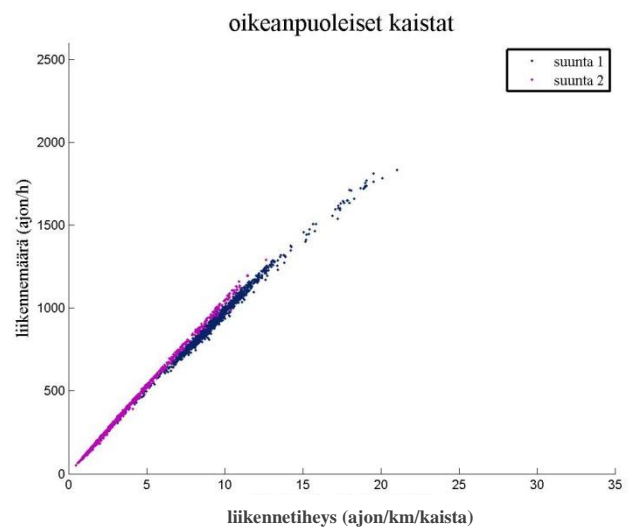
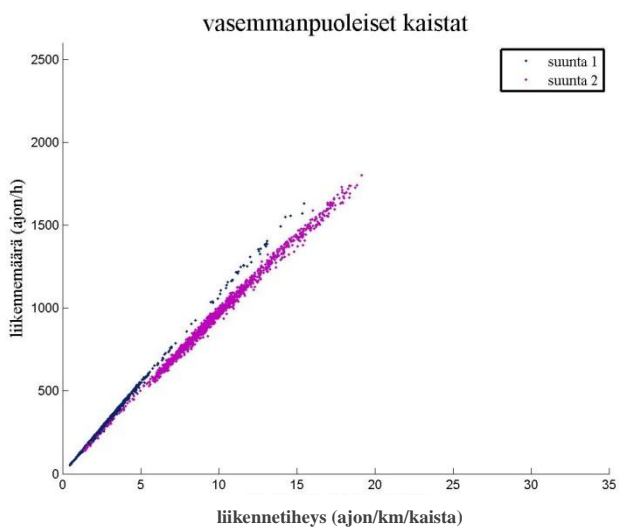
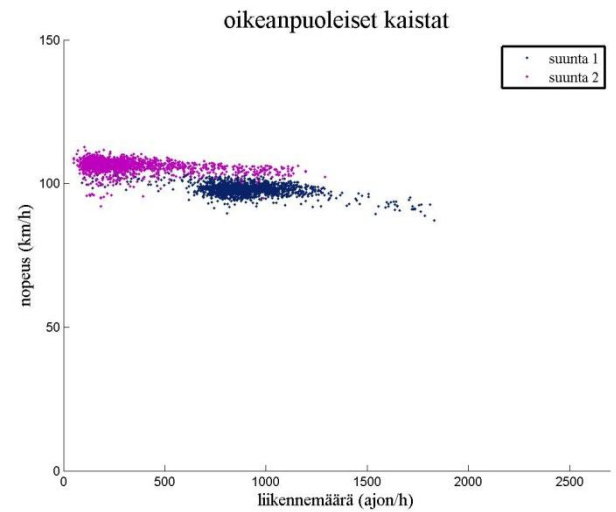
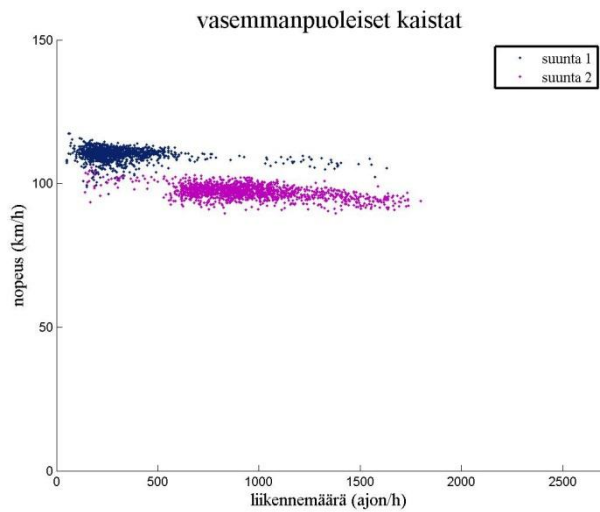
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 828, Rahusensalmi, Kuopio. Nopeusrajoitus 100 km/h



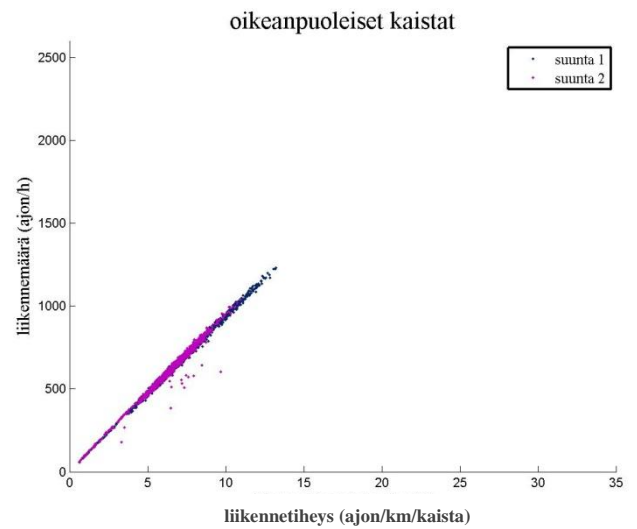
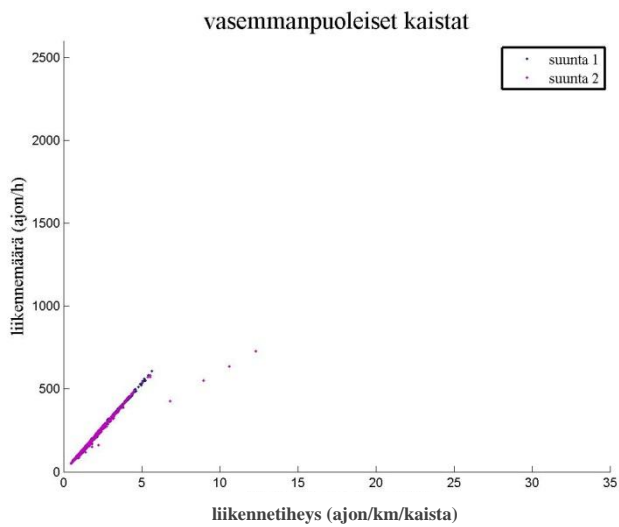
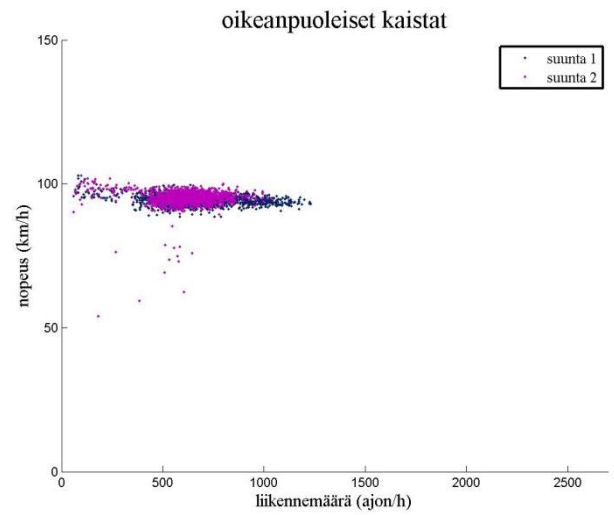
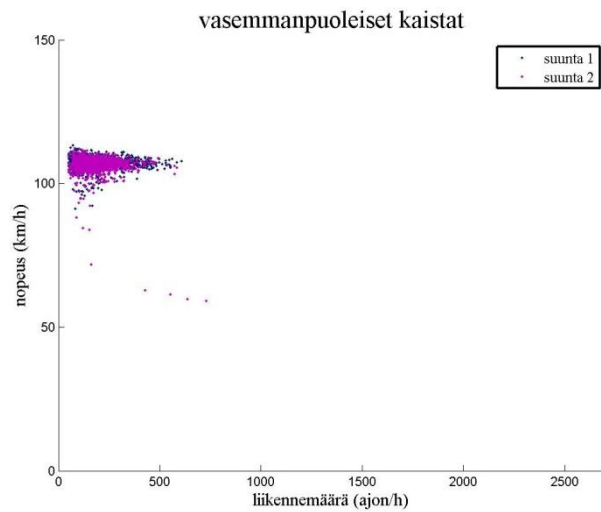
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 832, Levänen, Kuopio. Nopeusrajoitus 100 km/h



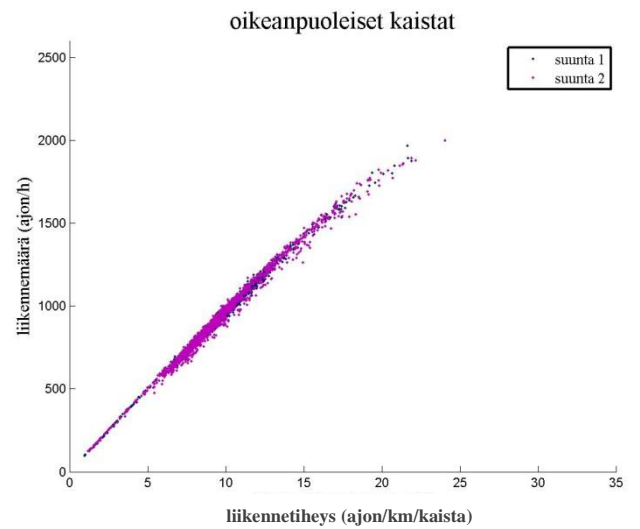
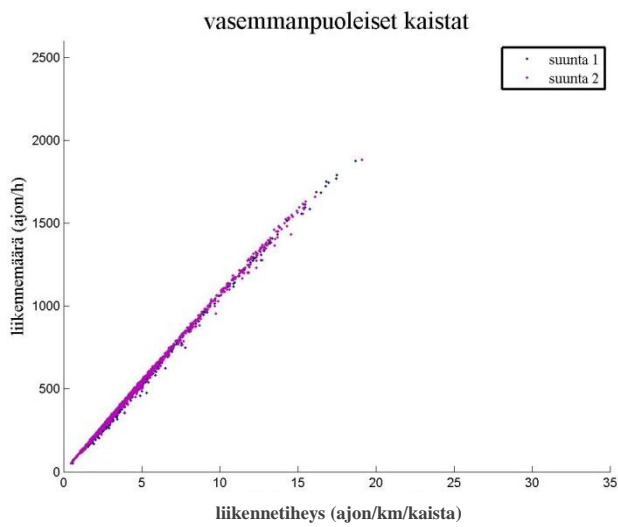
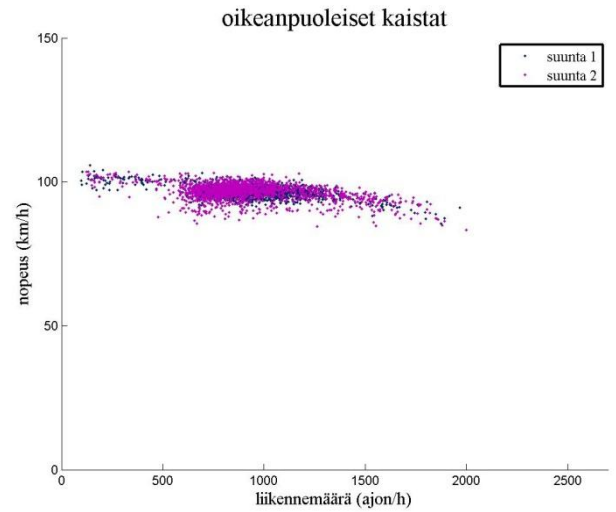
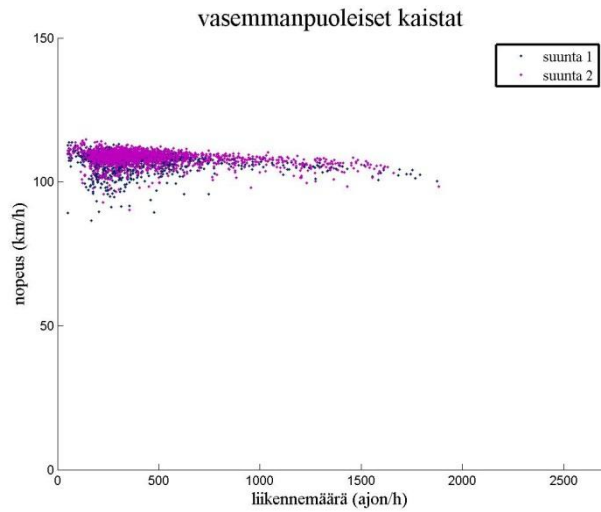
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 933, Palokka, Jyväskylä. Nopeusrajoitus 100 km/h



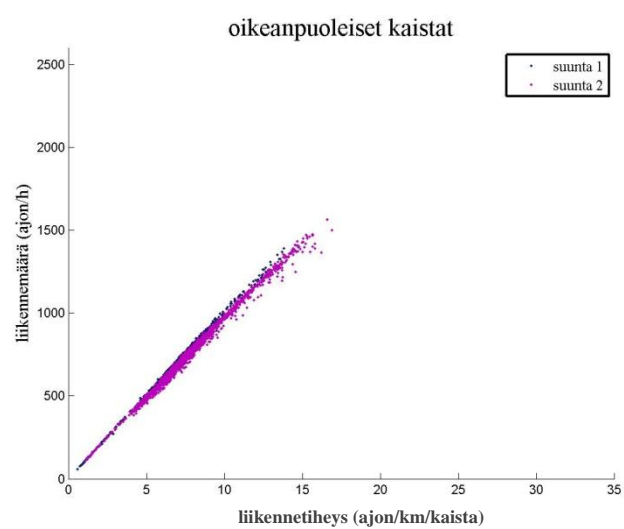
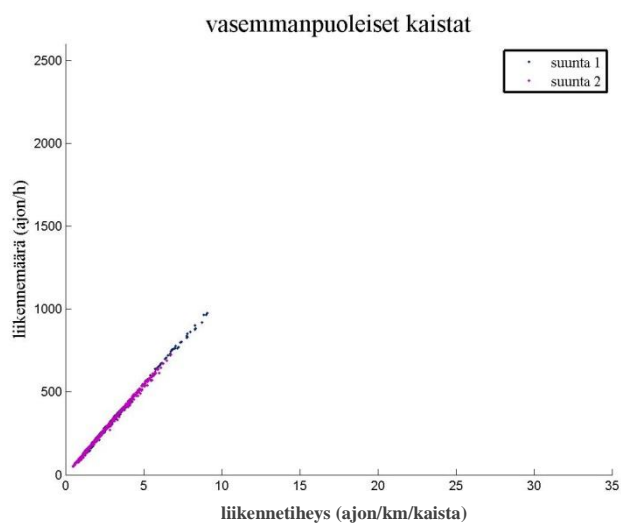
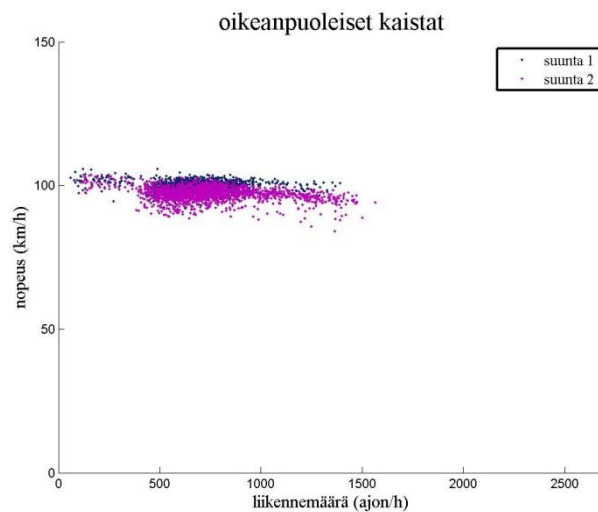
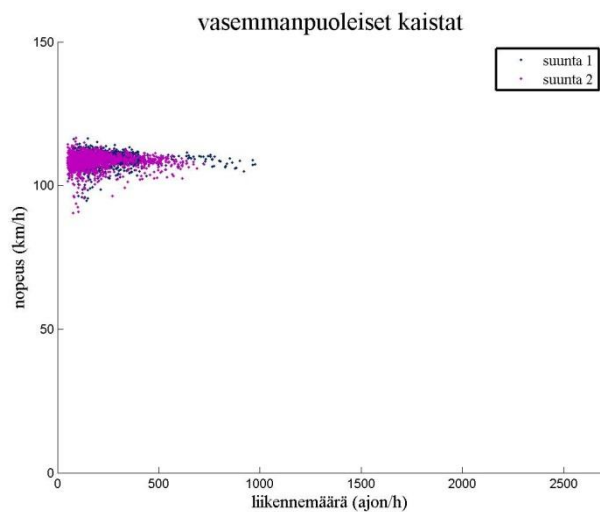
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 1201, Kaukovainio, Oulu. Nopeusrajoitus 100 km/h



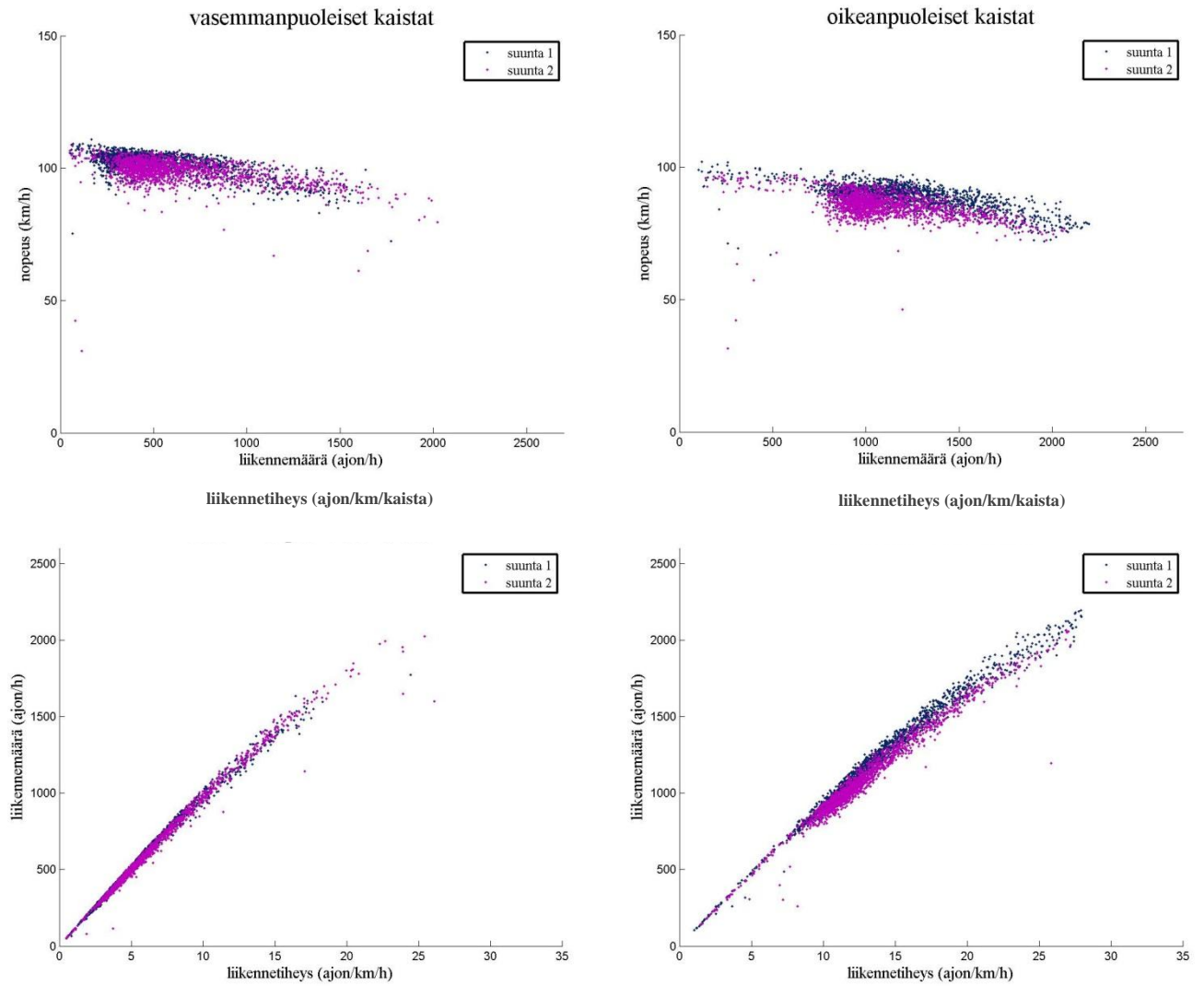
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 1226, Kempele. Nopeusrajoitus 100 km/h



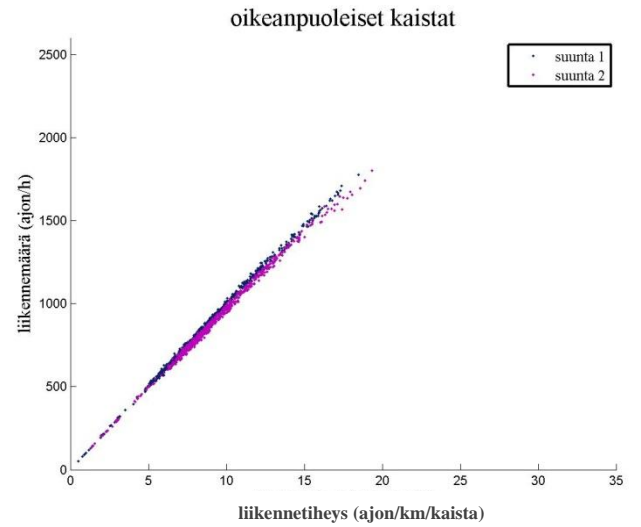
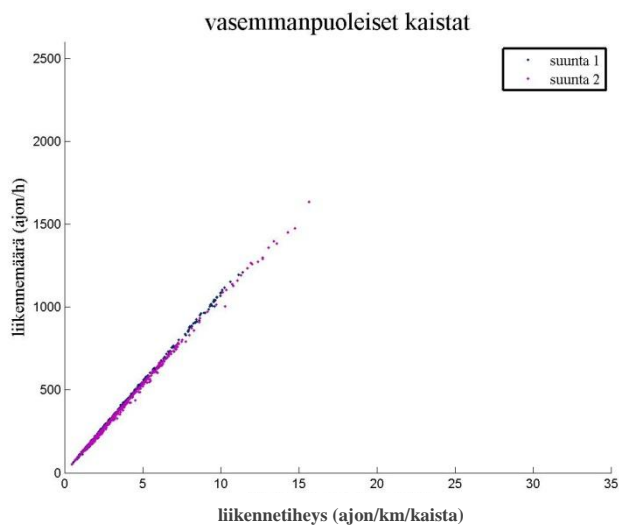
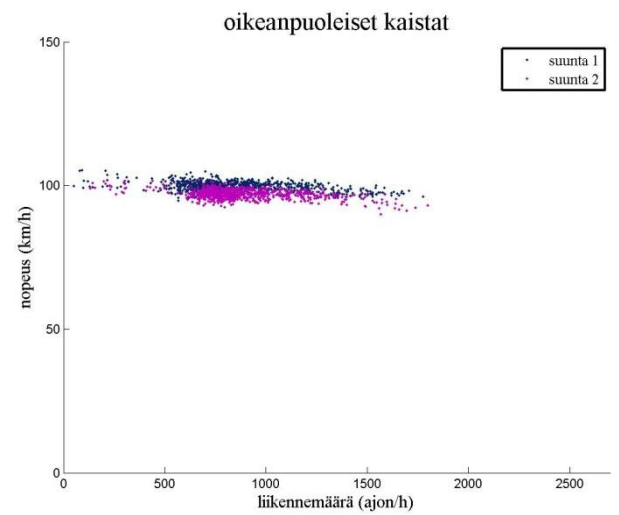
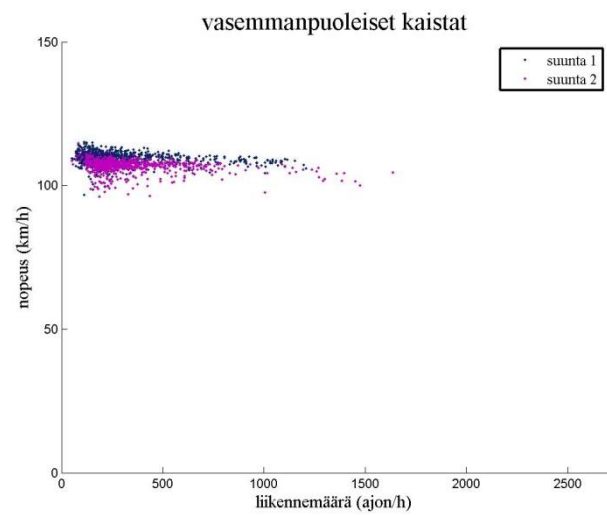
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 1237, Oulun kasarmi, Oulu. Nopeusrajoitus 100 km/h



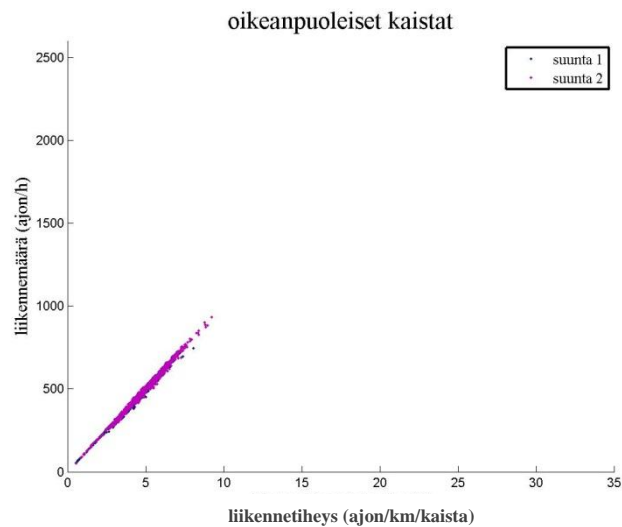
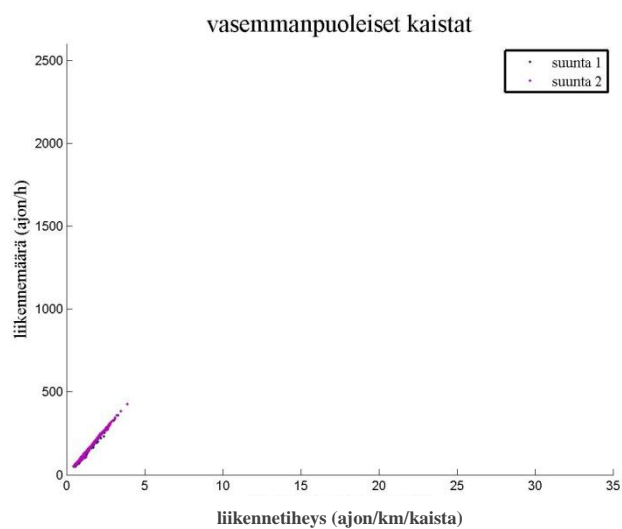
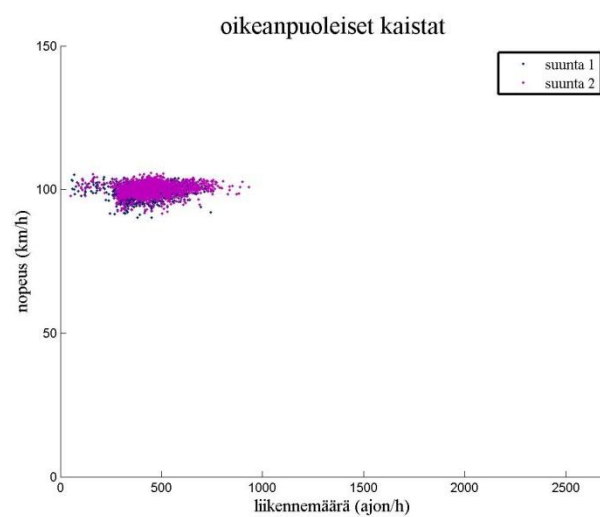
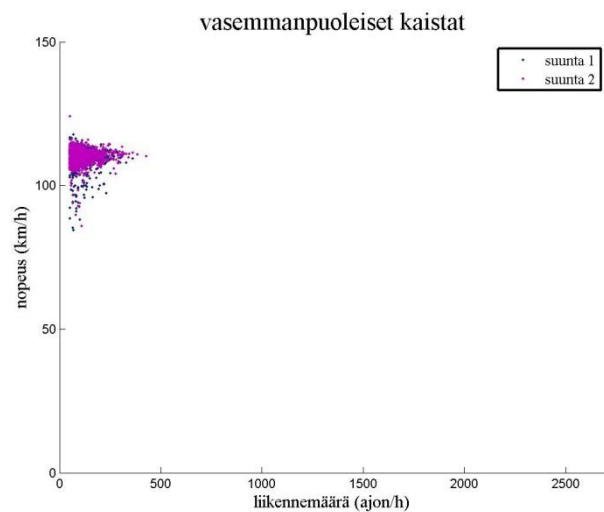
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 1238, Isko, Oulu. Nopeusrajoitus 100 km/h



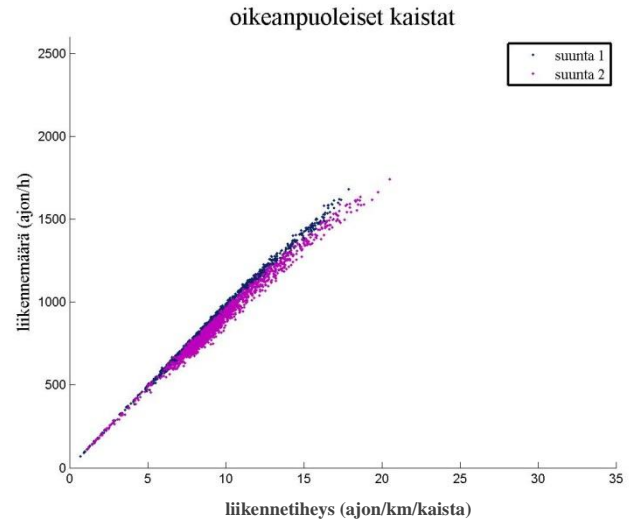
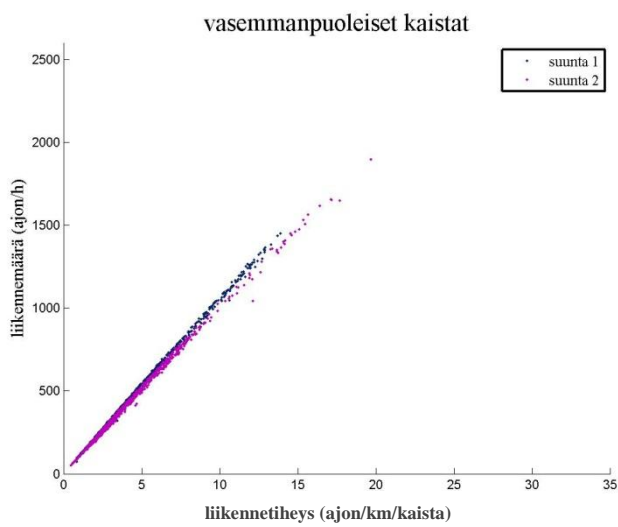
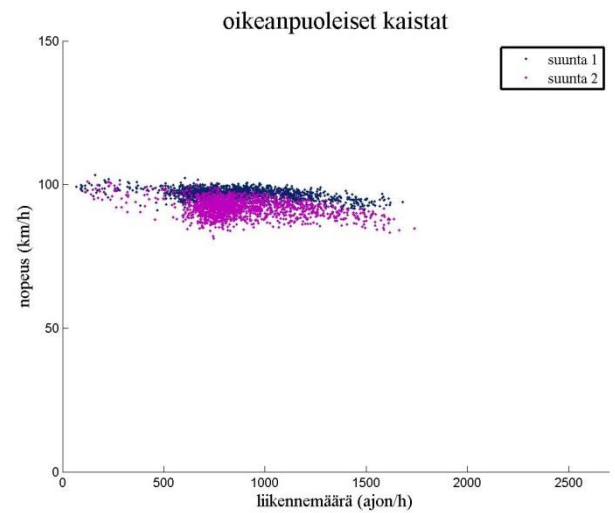
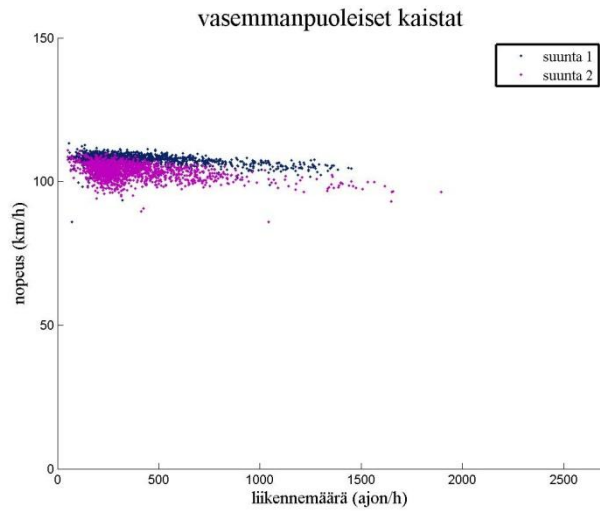
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 1243, Lauhasto, Liminka. Nopeusrajoitus 100 km/h



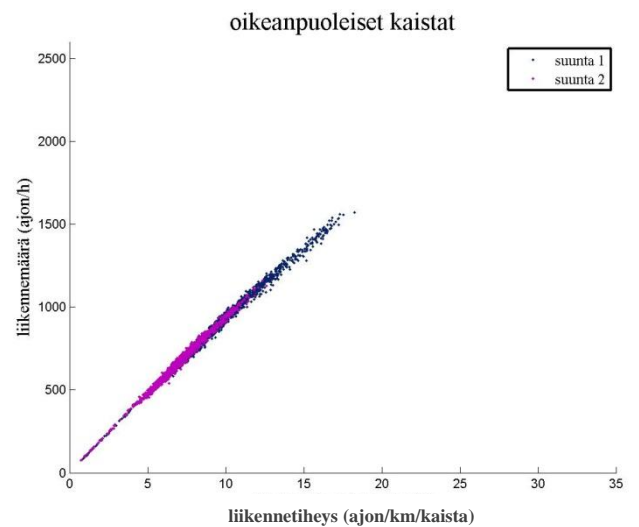
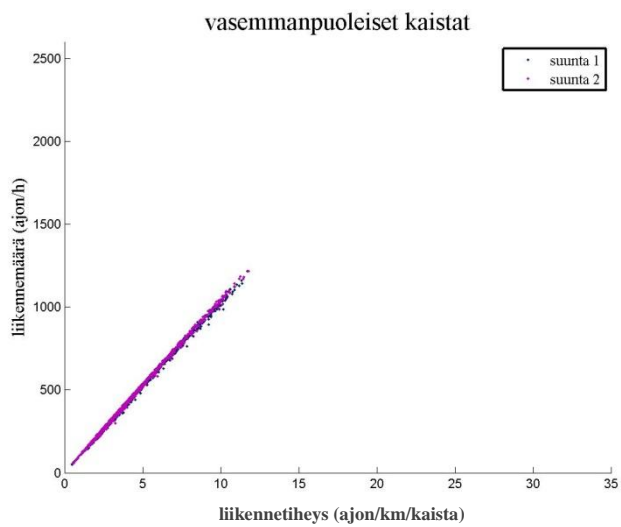
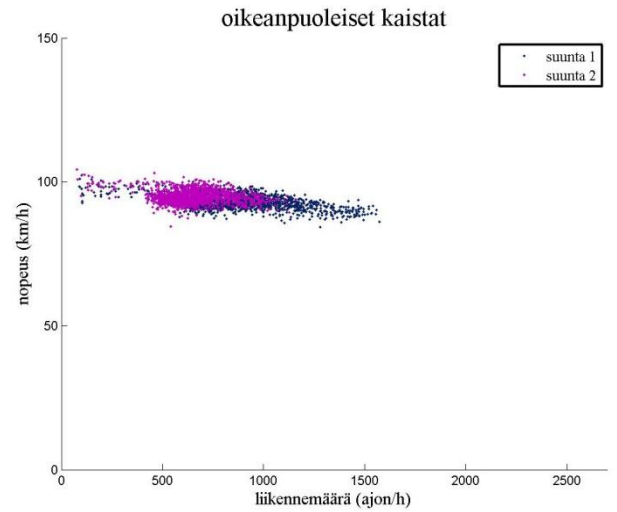
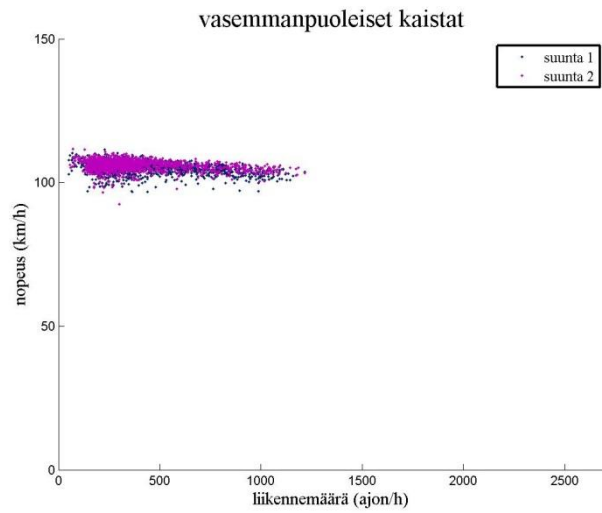
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 1244, Laanila, Oulu. Nopeusrajoitus 100 km/h



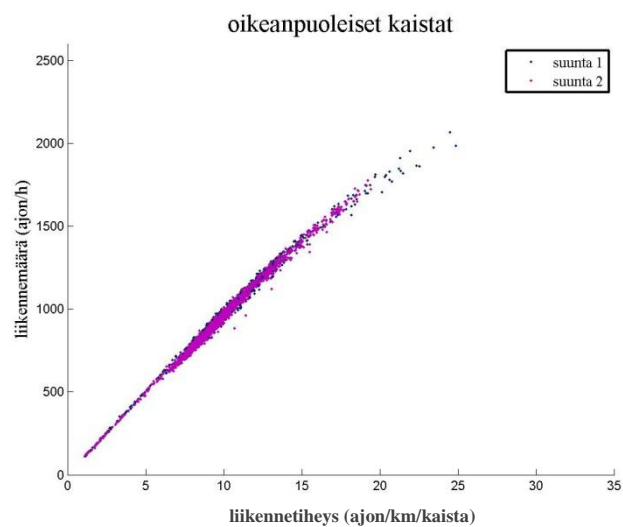
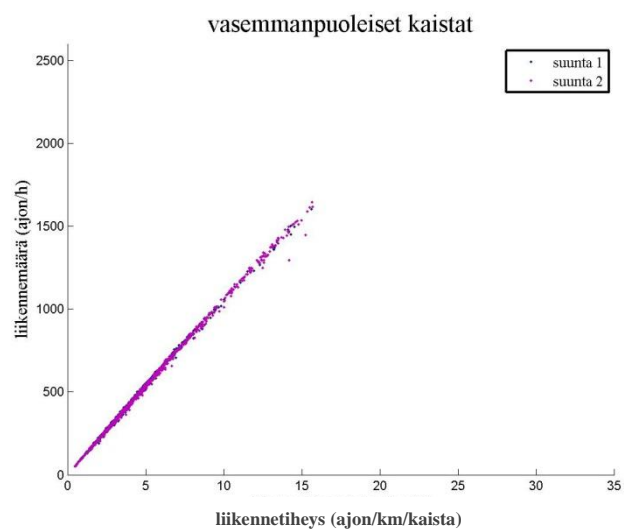
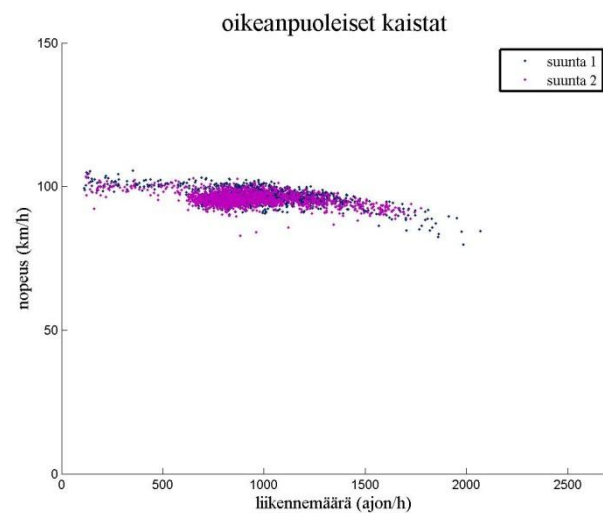
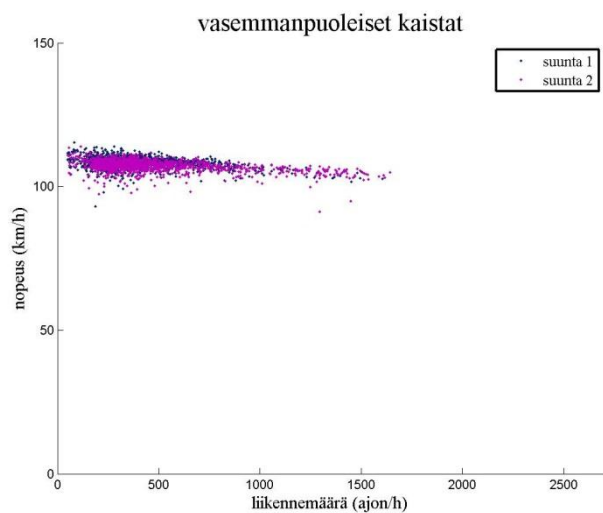
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 1250, Vällkylä, Oulu. Nopeusrajoitus 100 km/h



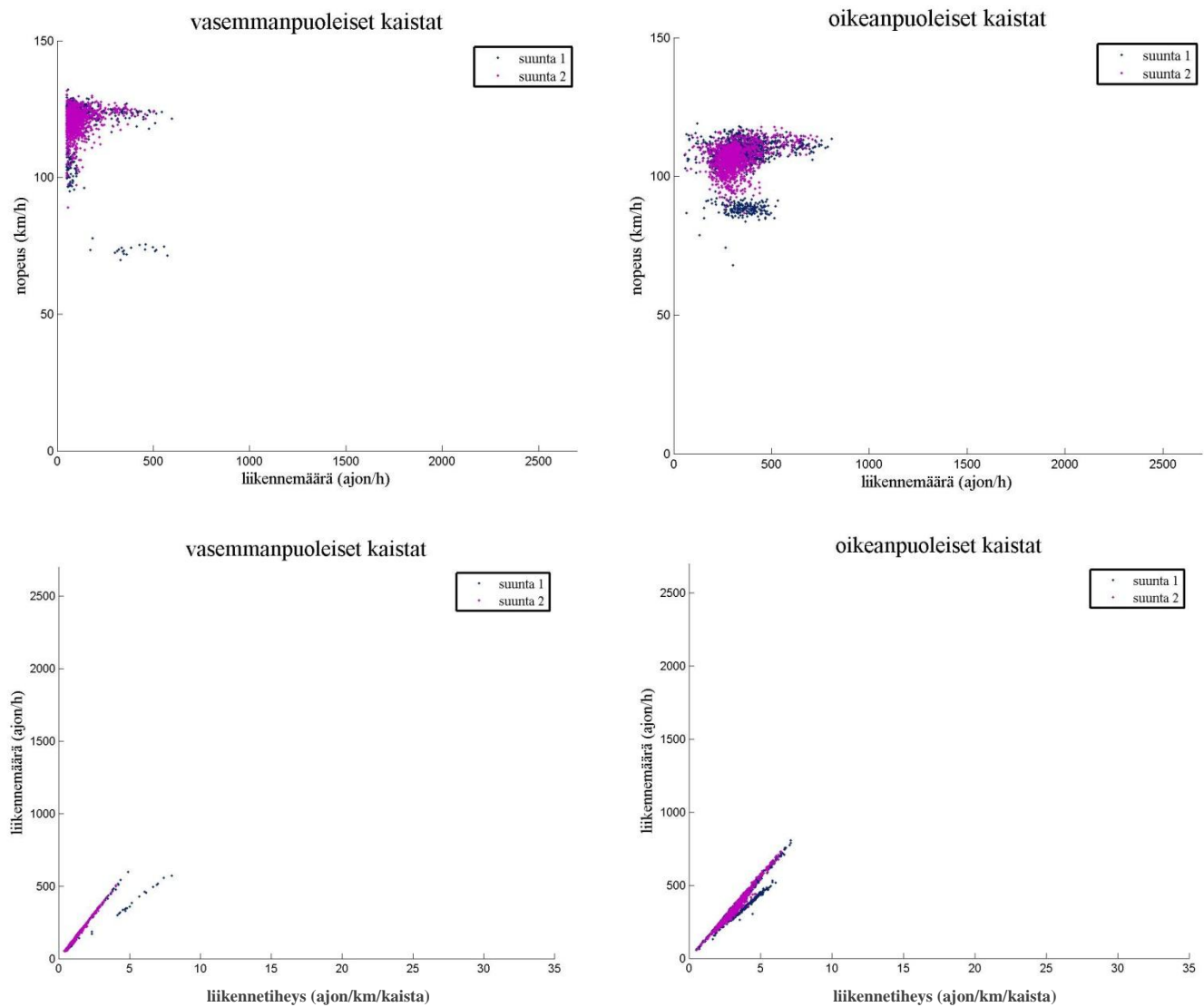
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 1251, Lintula, Oulu. Nopeusrajoitus 100 km/h



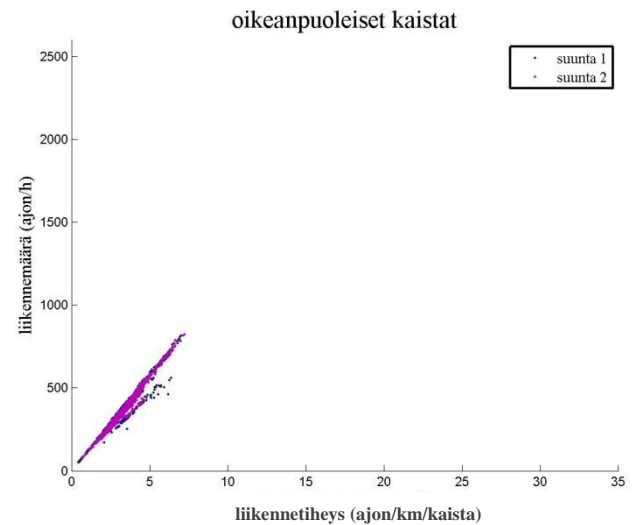
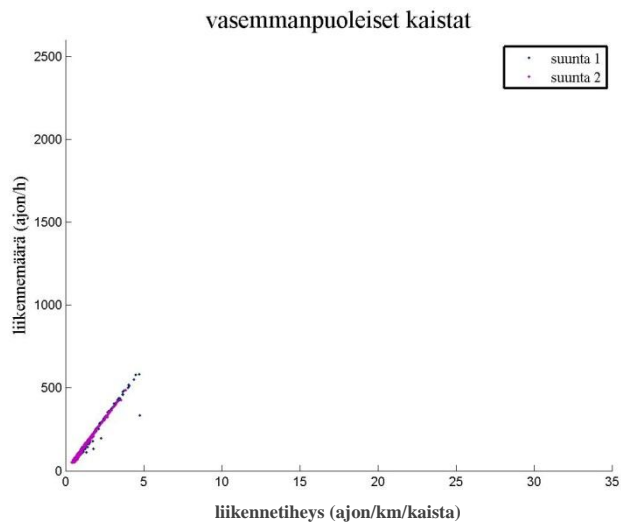
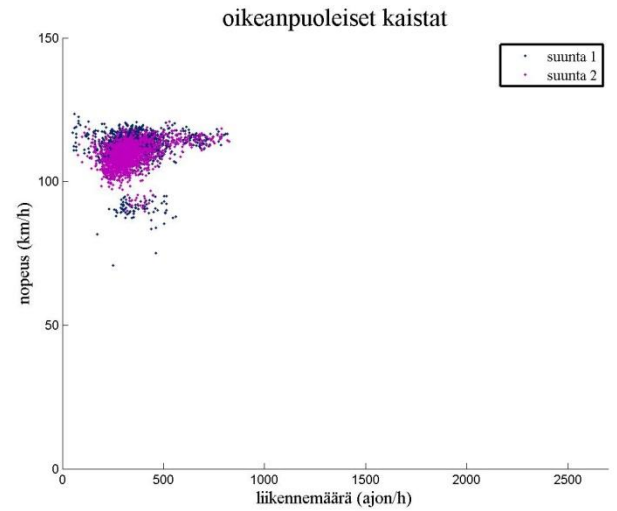
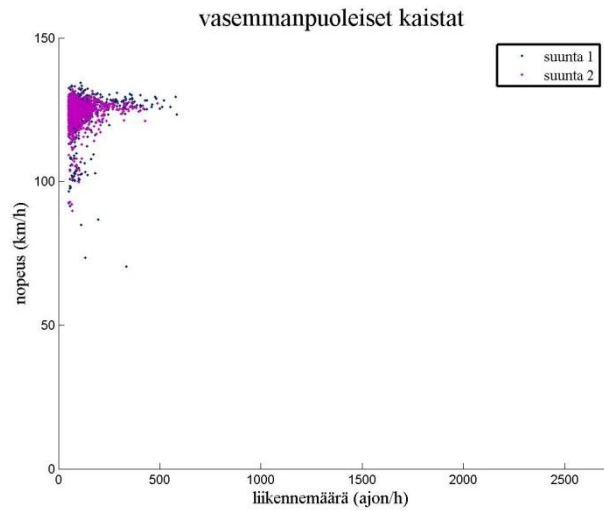
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 1601, Lakiamäki, Salo. Nopeusrajoitus 120 km/h



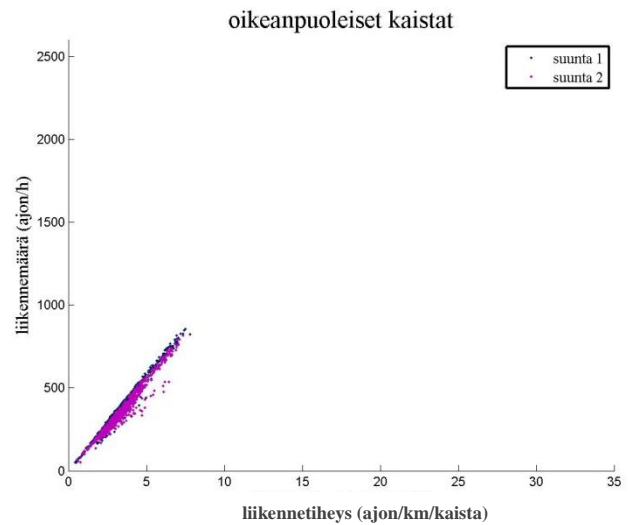
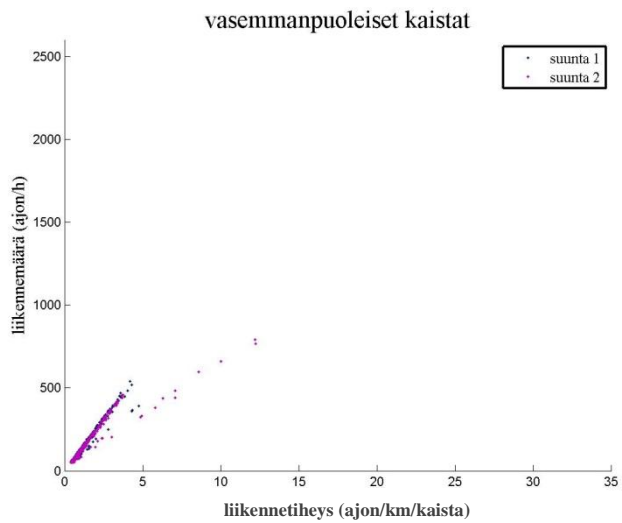
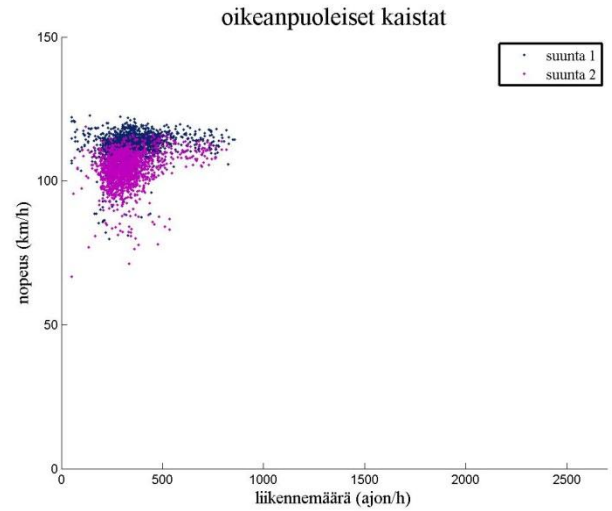
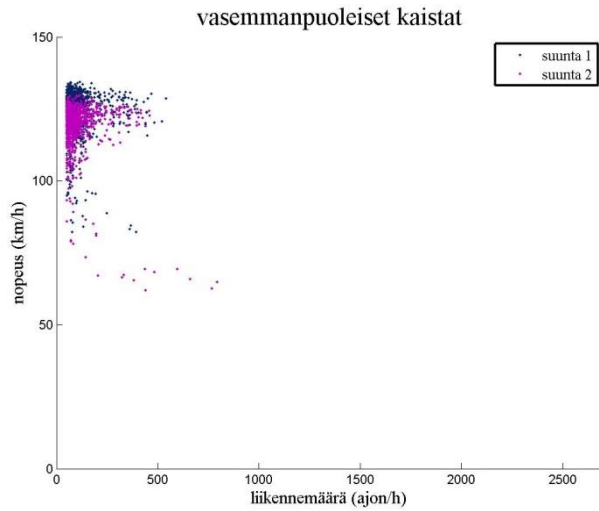
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 1602, Kruusila, Salo. Nopeusrajoitus 120 km/h



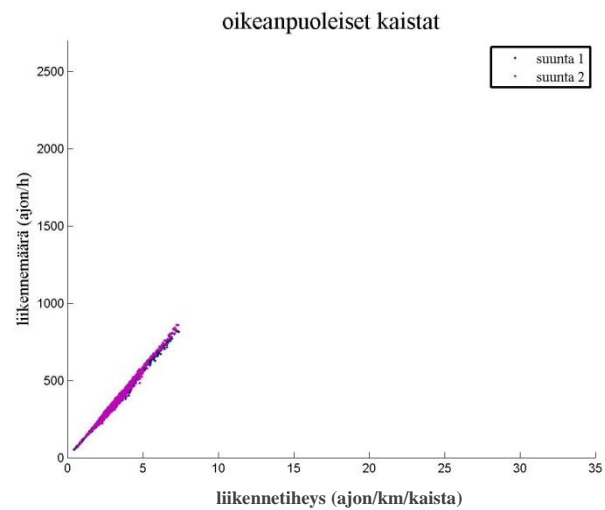
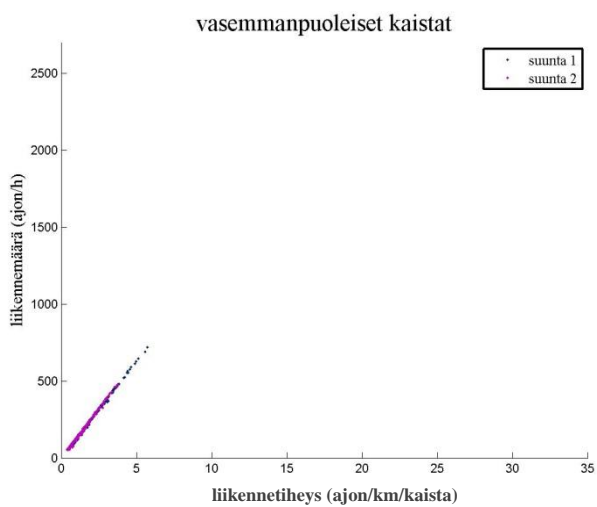
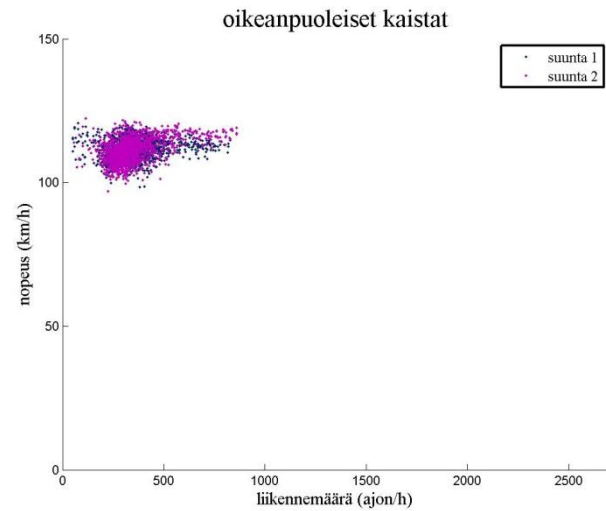
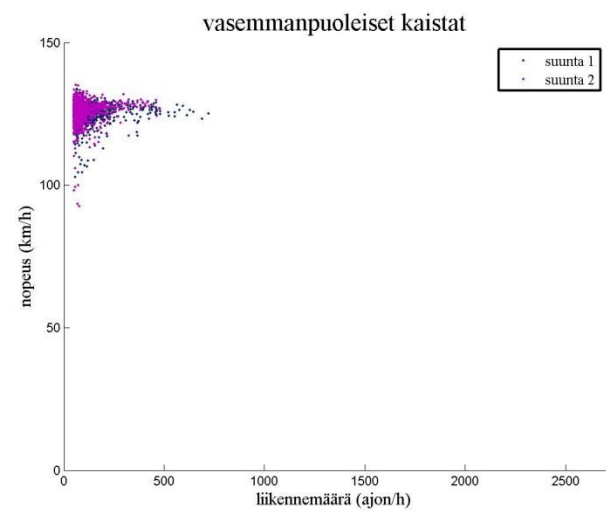
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 1603, Syvälampi, Salo. Nopeusrajoitus 120 km/h



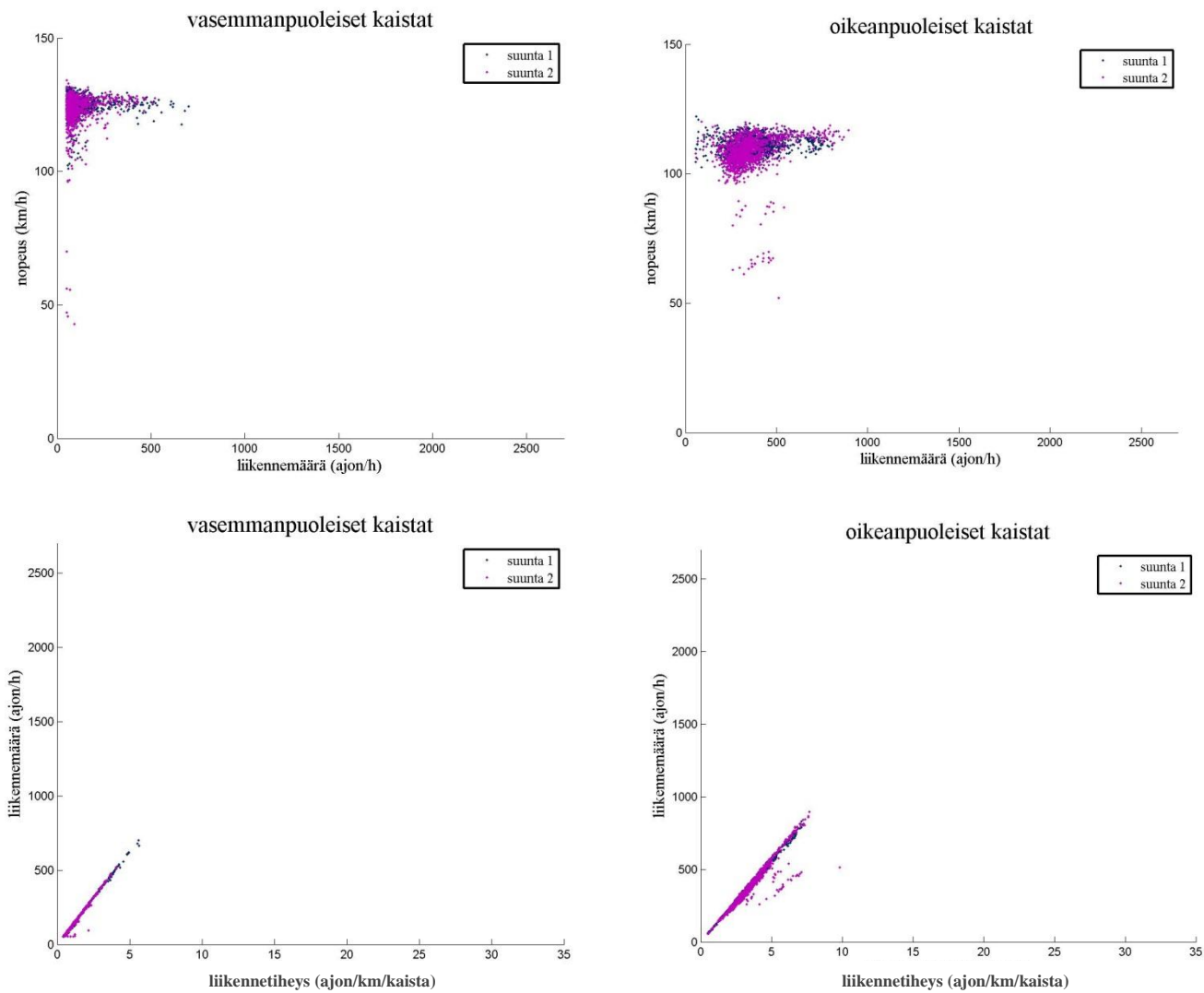
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 1604, Lahnajärvi, Salo. Nopeusrajoitus 120 km/h



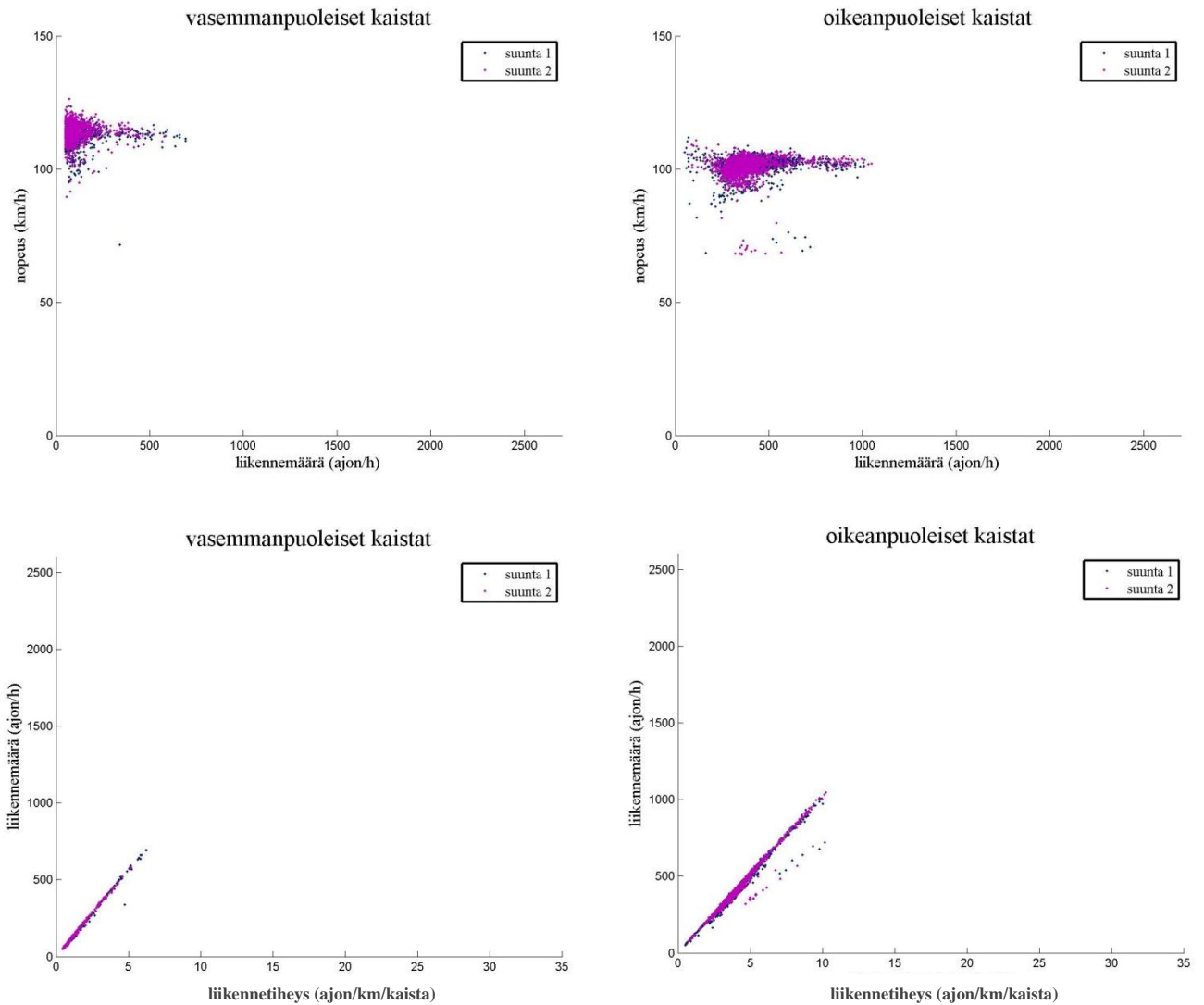
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 1605, Hauklampi, Lohja . Nopeusrajoitus 120 km/h



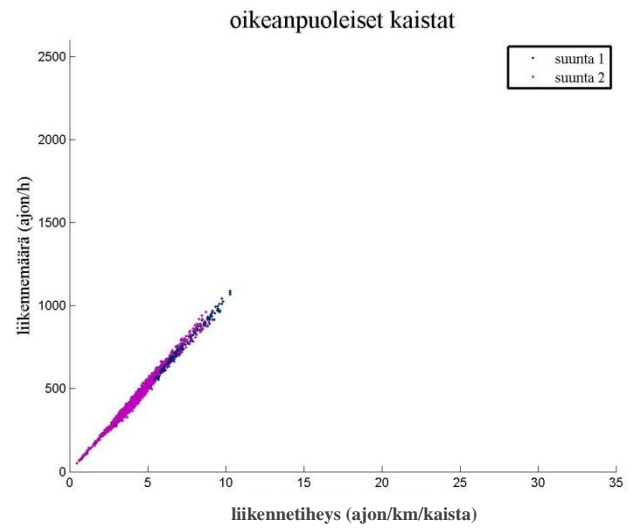
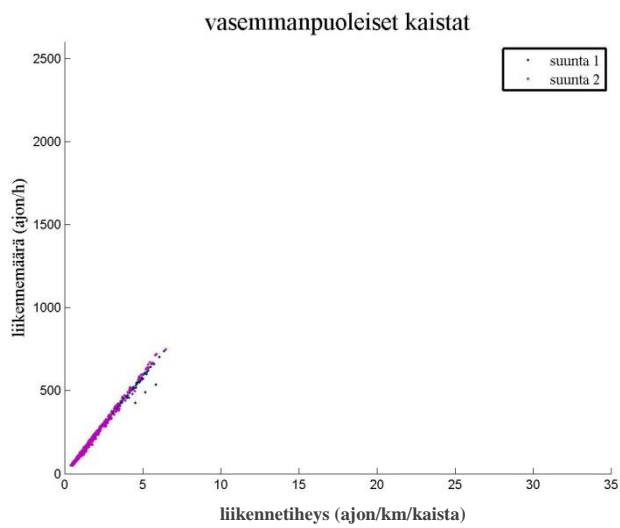
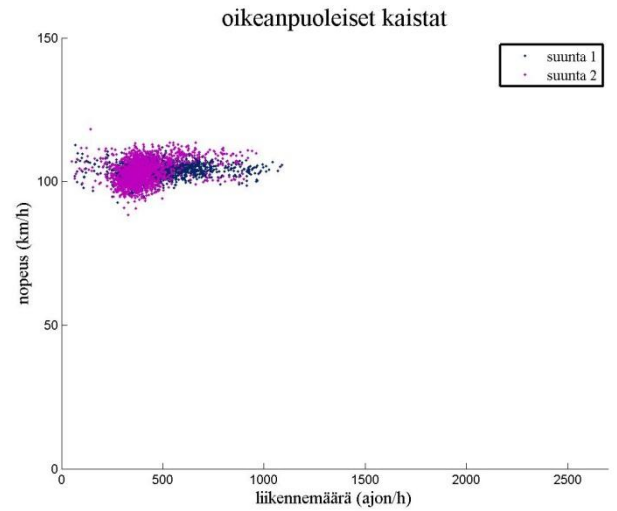
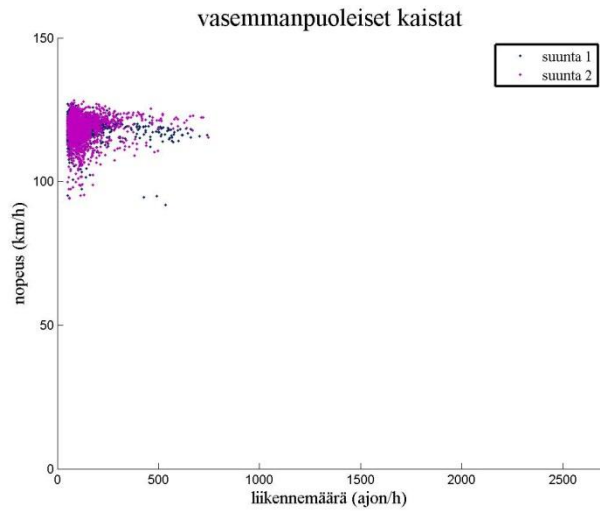
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvikuvaajat

LAM Nro. 1606, Pitkämäki, Lohja. Nopeusrajoitus 120 km/h



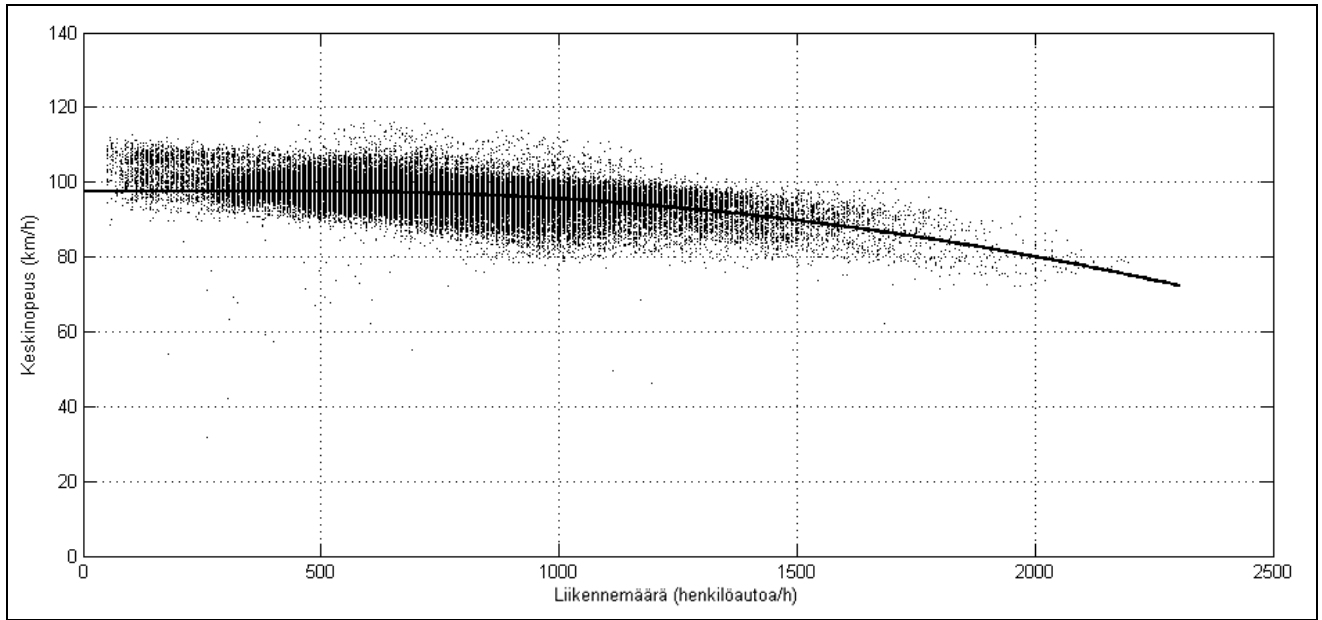
Liite 1: LAM-asemien liikennevirran pisteparvi kuvaajat

LAM Nro. 1607, Karnainen, Lohja. Nopeusrajoitus 120 km/h

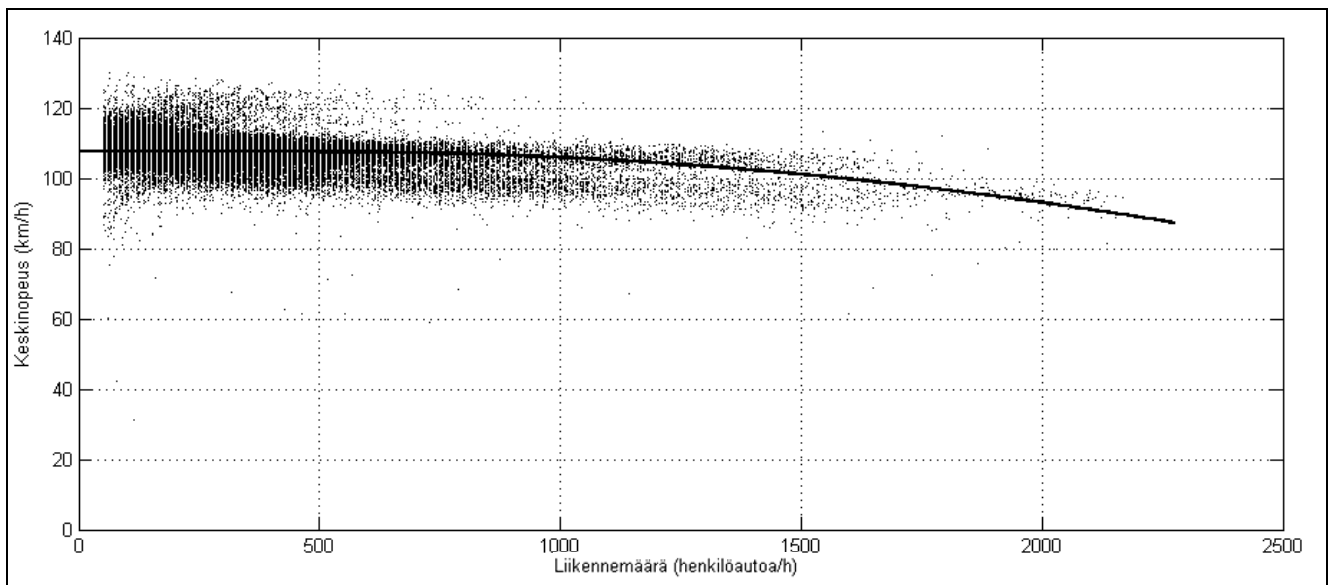


Liite 2

Nopeusrajoitus alueen 100 km/h analyysikuvat

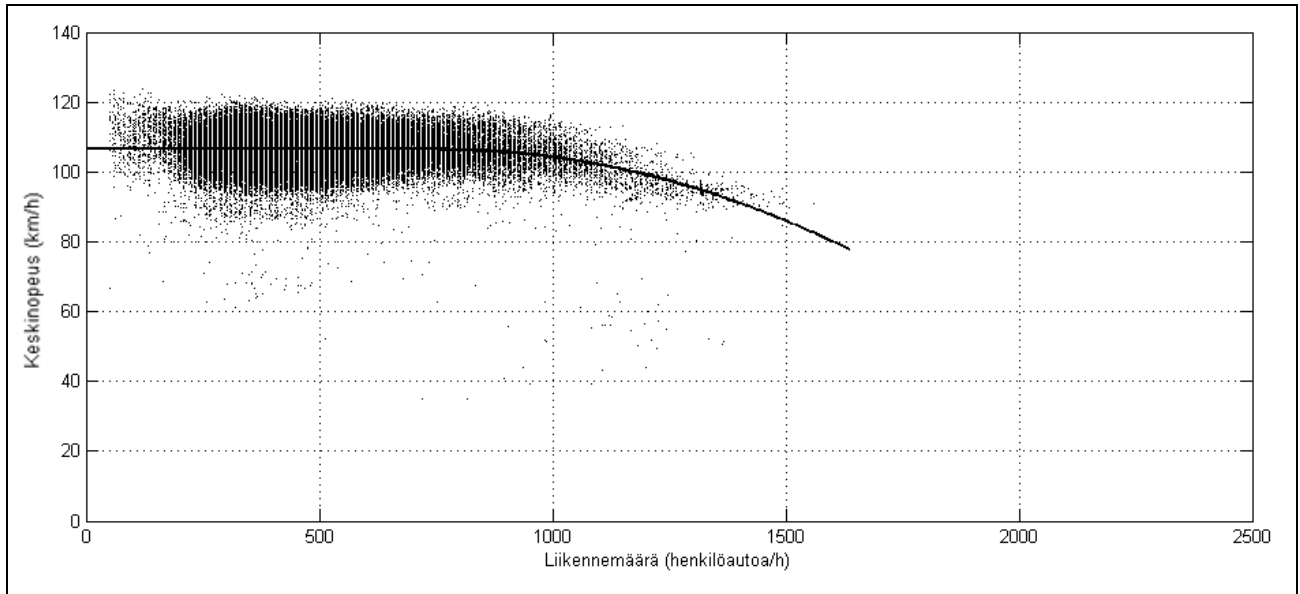


Kuva 1 Moottoritien linjaosuuden oikeanpuoleisen kaistan liikennevirta

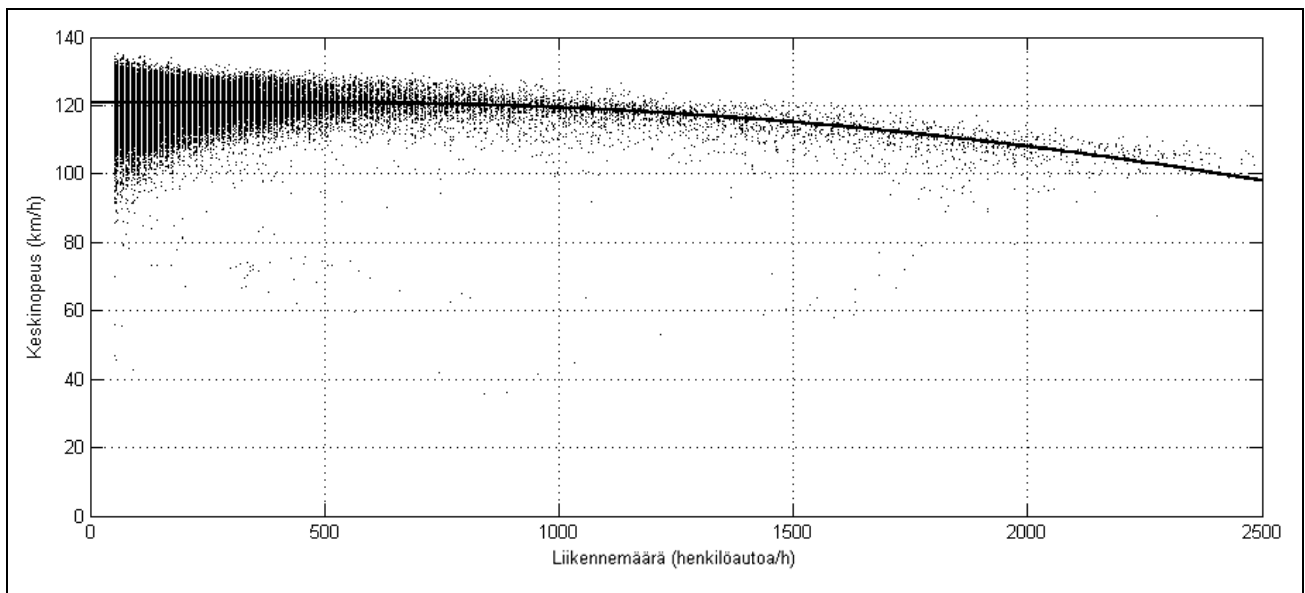


Kuva 2 Moottoritien linjaosuuden vasemmanpuoleisen kaistan liikennevirta

Nopeusrajoitus alueen 120 km/h analyysikuvat



Kuva 3 Moottoritien linjaosuuden vasemmanpuoleisen kaistan liikennevirta



Kuva 4 Moottoritien linjaosuuden vasemmanpuoleisen kaistan liikennevirta